


Ex-libris
Charles Atwood
Kofoid

LEERBOEK

DER

NATUURKUNDE.

Gedrukt bij G. J. THIEME, te Arnhem.

C. La Fontijn

LEERBOEK

DER

NATUURKUNDE,

DOOR

Dr. D. J. STEYN PARVÉ.

TIEL.
H. C. A. CAMPAGNE.

1860.

VOORBERIGT.

Bij de zamenstelling van dit leerboek is het voornamelijk mijne bedoeling geweest het zoodanig in te rigten, dat het geschikt was om bij het middelbaar onderwijs gebruikt te worden. Wel is waar is het er nog verre van af, dat in alle gymnasien en andere middelbare scholen de natuurkunde onderwezen wordt; maar het is te verwachten, dat bij eene regeling van het middelbaar onderwijs aan deze belangrijke wetenschap de haar toekomende plaats onder de leervakken zal worden toegekend.

Hoewel dit werk, wat inhoud en wijze van behandeling aangaat, met de meeste buitenlandsche van dien aard overeenkomt, zoo heb ik nogtans gemeend in sommige opzigten daarvan te moeten afwijken. Ik acht mij verpligt hier rekenschap te geven van de redenen, welke mij tot de voornaamste dier afwijkingen geleid hebben.

Een gedeelte van het hoofdstuk, waarin de bijzondere eigenschappen der ligchamen behandeld worden, heb ik gewijd aan eene korte uiteenzetting van de gronden der scheikunde. Sommige verschijnselen, die tot het gebied der eigenlijke natuurkunde behooren, kunnen niet grondig verklaard worden, zoo de leerling niet bekend is met den aard der scheikundige krachten, met eenige der wetten, volgens welke scheikundige verbindingen plaats hebben, en met de wijze, waarop sommige stoffen scheikundig op elkander werken. In de eerste plaats is die kennis noodig bij de behandeling van het galvanisme, vooral wanneer men, zoo als ik gedaan heb, de scheikundige theorie van de galvanische keten aanneemt; de scheikundige werking van den electrischen stroom kan zonder kennis van scheikundige verbindingen, bases, zuren en zouten evenmin begrepen worden. Bij de warmteleer bekleedt de scheikundige werking eene voorname plaats onder de warmtebronnen; bij het licht zelfs behoort men van de daardoor teweeggebragte scheikundige werking te spreken. Worden nu scheikunde en natuurkunde beide aan eene zelfde inrigting onderwezen, dan kan het onderwijs in die beide we-

tenschappen in zoodanig verband met elkander gebragt worden, dat het zuiver scheikundige gedeelte in het natuurkundig leerboek kan gemist worden. Ik geloof echter, dat de scheikunde nog bijna nergens aan eene middelbare school onderwezen wordt, en ik vrees, dat het nog geruimen tijd zal duren, alvorens zulks algemeen zal geschieden, althans op die soort van middelbare scholen, waar de noodzakelijkheid om deze wetenschap onder de leervakken op te nemen boven allen twijfel verheven is. Hoe dit echter zijn moge, met het oog op de tegenwoordige behoefte kwam het mij wenschelijk voor, dat in een leerboek der natuurkunde ook de algemeene gronden der scheikunde verklaard werden, en daarom heb ik hetgeen mij daarvan noodig toescheen in eene afzonderlijke afdeeling (bladz. 25—44) behandeld. Het spreekt van zelf, dat daar, waar afzonderlijk onderwijs in scheikunde gegeven wordt, dit gedeelte zonder nadeel kan worden overgeslagen.

Eene tweede opmerking geldt het gedeelte, waarin het evenwigt en de beweging van vaste ligchamen, vloeistoffen en gassen worden behandeld. Ik heb gemeend datgene, wat meer tot het gebied der toegepaste werktuigkunde behoort, zooals eene beschrijving van windassen, getande raderen, takels, touwwerktuigen, waterraderen, turbines en dergelijke werktuigen, te moeten achterwege laten of slechts in het voorbijgaan aanroeren. De leer der krachten, voor zooveel hare ontbinding en zamenstelling en hare eenvoudigste wetten aangaat, mogt natuurlijk niet gemist worden, evenmin als de hefboom, waarvan de kennis tot eene grondige verklaring der balans onmisbaar is. In één opzigt ben ik later van dit beginsel afgeweken, namelijk in het hoofdstuk over de warmte, waar ik verschillende stoomwerktuigen heb verklaard en ook de wijze, waarop de door die werktuigen verrigte arbeid wordt berekend, met eenige uitvoerigheid heb aangewezen. Het eerste zal, naar ik onderstel, mij door niemand ten kwade geduid worden, daar de stoomwerktuigen als eene der belangrijkste toepassingen van de warmte beschouwd mogen worden; voor het laatste meen ik eene verontschuldiging te vinden in de onvolledige wijze, waarop de berekening van den arbeid der stoomwerktuigen in de meeste elementaire boeken over werktuigkunde is behandeld.

De moleculaire werkingen van vaste ligchamen, vloeistoffen en gassen heb ik uitvoeriger behandeld dan in de meeste leerboeken geschiedt. Deze zoo belangrijke verschijnselen heb ik getracht te beschrijven en te verklaren op eene wijze, die mij voorkomt niet boven het begrip der leerlingen te gaan.

Het beginsel van het behoud van het arbeidsvermogen, dat tegenwoordig bij de verklaring der natuurverschijnselen hoe langer hoe meer eene belangrijke rol speelt, heb ik gemeend met eenige uitvoerigheid te moeten behandelen, en wel in dier voege, dat het beginsel zelf zijne verklaring vond, waar van evenwigt en beweging sprake was, terwijl de toepassingen bij de behandeling van de warmte en van den galvanischen stroom hare plaats vonden. Ik heb getracht, hetgeen op deze theorie betrekking heeft zooveel doenlijk in de beschrijving der verschijnselen in te weven en in verband daarmede te behandelen, zoodat dit beginsel zich als 't ware van zelf daaruit ontwikkelde; ik hoop,

dat ik er in geslaagd mag zijn dit gedeelte, dat tot dusverre, voor zooveel mij bekend is, nog in geen leerboek op die wijze behandeld is, op eene bevattelijke wijze voor te stellen.

Bij de behandeling van de warmte heb ik eene andere volgorde dan de doorgaans gevolgde aangenomen, omdat mij die meer rationeel toescheen. Na eene aanwijzing van de middelen ter bepaling van den warmtegraad behooren mijns inziens eerst de verschijnselen verklaard te worden, die betrekking hebben op de voortplanting der warmte, zoowel door straling als door geleiding; daarna moet de invloed van de warmte op de ligchamen, of beter gezegd, op hunne moleculen, verklaard worden, dus de uitzetting, de soortelijke warmte en de verandering van aggregatie-toestand, waarbij dan van zelve de gebondene warmte ter sprake komt. De mechanische warmte-theorie, in verband met de bronnen van warmte beschouwd, vormt dan een geschikt slot voor dit ook in de toepassingen zoo belangrijke hoofdstuk.

Als oorzaak van den galvanischen stroom heb ik de scheikundige werking vermeld; van de contact-theorie is slechts in het voorbijgaan melding gemaakt, als 't ware alleen om te zeggen, dat zij niet moet aangenomen worden. Deze wijze van behandeling zal welligt tegenspraak ondervinden, en toch meen ik daarvoor voldoende gronden te kunnen aanvoeren. In de eerste plaats toch zie ik geen kans de contact-theorie met het beginsel van het behoud van arbeidsvermogen overeen te brengen; de opname van dat beginsel in mijn leerboek leidde mij dus van zelf tot het aannemen der scheikundige theorie. Nu had ik wel daarnevens de contact-theorie kunnen ontwikkelen, en den leerlingen als 't ware de keuze kunnen laten, maar met het oog op het doel van mijn boek kwam mij dit minder doelmatig voor. Het hoofd der leerlingen op middelbare scholen mag mijns inziens niet worden opgevuld met tegenstrijdige theorien of hypothesen; maar de verschijnselen moeten zoodanig in verband met één hypothese aan hen worden voorgesteld, dat zij een helder begrip van het geheel verkrijgen. Daarom heb ik, in verband met hetgeen in de voorgaande hoofdstukken over het behoud van het arbeidsvermogen gezegd was, uitsluitend de scheikundige theorie van de galvanische keten aangenomen, al mogen dan ook enkele verschijnselen tot dusverre in die theorie nog geene volledige verklaring gevonden hebben. Te meer ben ik hiertoe overgegaan, omdat ik het er voor houd, dat het met de contact-theorie weldra zal gaan als met de emanatie-theorie van het licht, dat zij namelijk alleen tot de geschiedenis der natuurkundige wetenschappen zàl behooren.

Omtrent de wijze van behandeling van het hoofdstuk over het licht heb ik niets bijzonders hierbij te voegen, dan alleen, dat ik gemeend heb de buiging, polarisatie en dubbele straalbreking, vooral met het oog op hen, voor wie het boek in de eerste plaats bestemd is, kort te mogen behandelen.

Bij de vermelding van belangrijke ontdekkingen of onderzoekingen heb ik doorgaans het jaar opgegeven, waarin zij hebben plaats gehad; men vindt dit meestal tusschen haakjes achter den eigennaam vermeld. Het is wel eene zeer geringe bijdrage tot

de bij het natuurwetenschappelijk onderwijs mijns inziens te veel verwaarloosde geschiedenis dier wetenschappen; maar het is in alle gevallen toch iets.

Van de afbeeldingen zijn sommige vrij gevolgd naar andere in meer of min bekende leerboeken; verscheidene echter zijn geheel nieuw.

Ten slotte moet ik nog aan hen, die reeds bij hun onderwijs de twee eerste stukken van mijn leerboek ingevoerd hebben, mijn leedwezen betuigen, dat het derde stuk zooveel later dan beloofd was het licht ziet. Omstandigheden, onafhankelijk van mijnen wil en van dien des uitgevers, hebben tot deze vertraging aanleiding gegeven.

'S GRAVENHAGE Julij 1860. DR. D. J. STEYN PARVÉ.



INHOUD.

HOOFDSTUK IV.

EVENWIGT EN BEWEGING BIJ VLOEISTOFFEN.

A. Hydrostatica.

B. Hydrodynamica.

C. Moleculaire werkingen van de vochtdeeltjes op elkander en op vaste ligchamen.

HOOFDSTUK V.

EVENWIGT EN BEWEGING BIJ GASVORMIGE LIGCHAMEN.

A. Evenwigt van gassen.

G. Warmtebronnen; mechanische theorie der warmte.

HOOFDSTUK VIII.

ELECTRICITEIT EN MAGNETISME.

A. Wrijvings-electriciteit.

B. Galvanische electriciteit.

F. Inductie.

G. Diamagnetisme.

H. Dierlijke electriciteit.

I. Toepassingen der electrische stroomen.

Bladz.

HOOFDSTUK IX.

LICHT.

A. Aard, voortplanting en sterkte van het licht.

B. Terugkaatsing van het licht.

C. Breking van het licht..

INLEIDING.

1. **Natuur, natuurkundige wetenschap.** — Door natuur verstaan wij gewoonlijk zoowel de ligchamen die ons omringen, als de verschijnselen, die wij daaraan met behulp onzer zintuigen waarnemen. De natuurkundige wetenschap houdt zich dus in de eerste plaats bezig met ligchamen, dat is, met datgene, wat een gedeelte der onbegrensde ruimte inneemt; en in de tweede plaats met de verschijnselen, of de veranderingen welke die ligchamen ondergaan; van deze tracht zij het onderlinge verband en ook, zoo mogelijk, de oorzaken op te sporen.

2. **Indeeling.** — De groote verscheidenheid, die men zoowel bij de ligchamen, als in hunne verschijnselen opmerkt, wijst als van zelve de noodzakelijkheid aan, om het uitgebreid gebied der natuurkundige wetenschap in onderdeelen te splitsen. Men verdeelt haar gewoonlijk in twee groote afdeelingen, waarvan de eerste zich ten doel stelt, de in de natuur voorkomende ligchamen te beschrijven, naar hunne eigenaardige eigenschappen in groepen af te deelen, en deze groepen te benoemen en te leeren onderscheiden. Deze is dus eigenlijk eene natuurbeschrijving, en wordt gewoonlijk *natuurlijke geschiedenis* genoemd.

De andere afdeeling houdt zich bezig met de krachten, die in de ligchamen huisvesten, en tracht de wetten op te sporen, volgens welke de verschijnselen door deze worden voortgebragt. Deze laatste afdeeling, die men *natuurkunde* noemt, moet echter nogmaals in onderdeelen gesplitst worden. Vooreerst beschouwt men de verklaring der verschijnselen, die met het leven van be-

werktuigde ligchamen, d. i. planten en dieren, in verband staan, als eene bijzondere wetenschap onder den naam van *physiologie;* dat gedeelte der natuurwetenschap, dat zich bezig houdt met de wetten der verschijnselen, die op eene verandering der bestanddeelen der ligchamen berusten, noemt men *scheikunde*; terwijl daarentegen in de eigenlijke *natuurkunde* of *physica* die verschijnselen worden nagegaan, die niet op zoodanige verandering berusten. Hierbij moet echter opgemerkt worden, dat de bewerktuigde ligchamen, die, zoo als wij zagen, het onderwerp der physiologie uitmaken, niet geheel van het gebied van de twee laatstgenoemde wetenschappen zijn uitgesloten, namelijk in zooverre zij ook aan de wetten der onbewerktuigde ligchamen onderworpen zijn; terwijl eindelijk natuurkunde en scheikunde menigmaal zoozeer in elkander grijpen, dat vele verschijnselen zoowel bij de beschouwing der eene, als der andere, moeten besproken worden. De grens dezer wetenschappen kan dus onmogelijk scherp afgebakend worden, en eenige kennis van de eene mag onmisbaar gerekend worden voor hem, die van de andere meer dan eenige oppervlakkige begrippen wenscht te verzamelen.

3. **Wijze van behandeling.** — Alvorens over te gaan tot de behandeling der natuurkunde, behoort men de methode te leeren kennen, welke bij alle grondig natuurkundig onderzoek moet toegepast worden. Die methode zal in een naauw verband moeten staan met den aard der natuurkundige wetenschap zelve; en daar deze de wetenschap is, welke ons de verschijnselen en eigenschappen der ligchamen in de natuur moet leeren kennen, en daaruit de wetten en oorzaken dier verschijnselen leeren afleiden, zoo ligt het besluit bij de hand, dat eene zuivere kennis alleen langs den weg der *ervaring* kan verkregen worden, en dat de natuurkunde dus eene *ervaringswetenschap* is.

Die ervaring kan echter tweeledig zijn. In de eerste plaats kan men ze verkrijgen door verschijnselen, die zich in de natuur aan ons voordoen, gade te slaan; dit noemt men *waarneming.* Niet altijd echter zijn de omstandigheden aanwezig, waaronder die verschijnselen zich vertoonen, en dikwijls ook zijn die verschijnselen zoo ingewikkeld, dat het moeijelijk, zoo niet onmogelijk wordt, de verschillende gelijktijdige werkingen van elkander te scheiden; daarom tracht men de ligchamen in zoodanige omstandigheden te plaatsen, dat zij juist die verschijnselen, welke wij wenschen waar te nemen, te voorschijn brengen; dit noemen wij *proefneming.*

In die op de eene of andere wijze waargenomene verschijnselen moet men trachten eenen regel, eene wet te vinden, die men daarom *natuurwet* noemt. Die wetten echter hebben ook weder hare oorzaken; en het zijn deze laatste, niet meer in zich zelve, maar alleen in hare uitwerking waarneembare oorzaken,

aan welke men den naam van *krachten* geeft. Ook deze op te sporen is het doel der natuurkunde; maar het is onmogelijk om de krachten zelven, die in een naauw verband staan met het wezen der ligchamen, te leeren kennen; men moet zich dan ook tevreden stellen, die krachten, die nimmer het voorwerp eener onmiddelijke waarneming kunnen zijn, niet anders te kennen, dan door de wetten, van welke zij de oorzaken zijn. Is men eenmaal zoover gekomen, dat men zoodanige wet in hare grootste eenvoudigheid heeft leeren kennen, dan zal het veelal mogelijk zijn hieruit, voornamelijk langs wiskundigen weg, gevolgtrekkingen te maken, die op nieuwe, tot nog toe ongekende of onopgemerkte verschijnselen wijzen.

Gelukt het echter niet bij de verklaring van eenig verschijnsel de oorzaak met volkomene zekerheid aan te wijzen, en blijft dus de aard der kracht onbekend, dan tracht men toch dat verschijnsel door zekere onderstelling of *hypothese* te verklaren. Van zoodanige hypothese zal men zich met vrucht kunnen bedienen, om het verband van verschillende verschijnselen beter te leeren opmerken, en aldus beter tot de kennis der eigenlijke oorzaak te geraken; men zal er ook gevolgtrekkingen uit kunnen afleiden, even als van elke stellige natuurwet; maar één enkel verschijnsel, dat in tegenspraak is met de gevolgen, uit die hypothese afgeleid, is voldoende, om haar als geheel onhoudbaar te verwerpen. Wij zullen zien, dat men in de natuurkunde menigmaal tot hypothesen zijne toevlugt moet nemen, en dat, al zijn de verschijnselen naauwkeurig bekend, de grondoorzaak toch dikwijls nog in het duister ligt.



HOOFDSTUK I.

ALGEMEENE EIGENSCHAPPEN DER LIGCHAMEN.

---

4. **Algemeene eigenschappen.** — Daar de natuurkunde, zoo als wij gezien hebben, zich bezig houdt met de verschijnselen, die aan de ligchamen worden waargenomen, moet men in de eerste plaats de hoedanigheden leeren kennen, die eigen zijn aan de stof, waaruit die ligchamen bestaan. Dat een ligchaam uitgebreidheid heeft, en dat op eene zelfde plaats zich niet te gelijk twee ligchamen bevinden kunnen, of zoo als men het gewoonlijk noemt, dat de stof ondoordringbaar is, is een onmiddelijk gevolg van de beteekenis, die men aan de woorden *stof* of *ligchaam* hecht; zonder deze hoedanigheden zouden de ligchamen niet kunnen bestaan. Er zijn echter andere eigenschappen, die niet zoo zeer eene onmisbare voorwaarde tot het bestaan der stof uitmaken, maar van welke de waarneming ons leert, dat zij aan haar eigen zijn, onder welken vorm zij zich ook moge vertoonen. Deze zijn het, die gewoonlijk *algemeene eigenschappen* der ligchamen genoemd worden.

5. **Deelbaarheid.** — In de eerste plaats leert ons de ervaring dat alle ligchamen door zagen, vijlen, wrijven, uittrekken, of andere werktuigelijke middelen in kleine deelen kunnen verdeeld worden, en dat die deeling zich zoover kan uitstrekken, als onze zintuigen ons toelaten het waar te nemen. Het zijn vooral sommige metalen, zoo als goud en platina, die voor zulk eene verdeeling vatbaar zijn. Het goudblad kan men zoo dun maken, dat tien duizend blaadjes op elkander gelegd eene dikte van slechts ééne streep

zouden hebben. Van platina vervaardigde Wollaston eenen draad die slechts 1/1200 van eene streep dikte had, en waarvan duizend meters niet meer dan 5/100 van een wigtje wogen. Een sprekend voorbeeld van fijne verdeeling bieden ons de verfstoffen aan. Lost men 1/100 van een wigtje karmijn in 5 pond water op, dan is dit duidelijk rood gekleurd; in een druppel, waarvan er ongeveer 300,000 op die hoeveelheid water gaan, is de roode kleur zeer merkbaar, en daarin bevinden zich dus nog zeer vele deeltjes dier verfstof. Nog fijner moeten de deeltjes zijn van reukstoffen, zoo als muskus en andere, die men jaren lang ergens kan laten liggen, gedurende welken tijd zij hunnen geur verspreiden, zonder dat men kan bemerken dat zij eene vermindering in gewigt ondergaan.

Ook in de natuur vinden wij voorbeelden van fijne verdeeling. Zoo is bijv. de dikte van den zijdedraad, zoo als hij door den zijdeworm gesponnen wordt, slechts 1/100 van eene streep, terwijl de spinragdraden zoo fijn zijn, dat 10,000 van hen niet meer dan de dikte van een hoofdhaar vormen. Het bloed van menschen en dieren bestaat uit eene kleurlooze vloeistof, waarin kleine roode bolletjes drijven, die een diameter hebben tusschen 1/128 en 1/250 van eene streep; bij de vogels zijn zij de grootste, bij de zoogdieren de kleinste, bij den mensch gemiddeld 1/150 van eene streep. Er zijn diertjes, zoogenaamde *afgietseldiertjes* of *infusoriën*, die niet dan bij sterke vergrooting zigtbaar zijn, en waarvan er, volgens Ehrenberg, 40,000 millioen op één kub. duim gaan; de ligchamen dezer diertjes zijn toch ook weder uit verschillende organen zamengesteld.

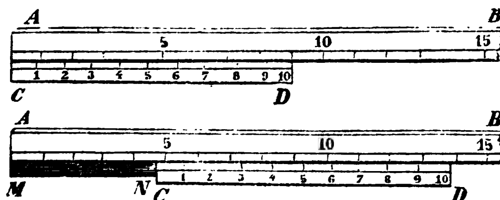
6. **Atomen.** — Uit deze en vele andere waarnemingen mogen wij afleiden dat alle ligchamen deelbaar zijn. Hoewel men zich aan die verdeeling der stof eigenlijk moeijelijk eene grens denken kan, daar elk deeltje, hoe klein ook, toch uitgebreidheid behoudt, en als zoodanig weer deelbaar moet wezen, zoo heeft men toch, vooral op grond van de scheikundige eigenschappen der stof, aangenomen, dat de ligchamen bestaan uit zeer kleine deeltjes, die niet meer deelbaar zijn, en die men daarom *atomen* (1) genoemd heeft. De *atomen* moeten echter niet verward worden met hetgeen men gewoonlijk stofdeeltjes of *moleculen* noemt, en waarmede men kleine, maar volstrekt niet ondeelbare deelen der ligchamen bedoelt; een molecule bestaat uit een groot aantal atomen, die òf van dezelfde, òf van verschillende soort kunnen zijn. Zijn alle moleculen van een ligchaam gelijksoortig, dan noemt men het gelijkslachtig of *homogeen*.

---

(1) *Atomen* is van het Grieksch afgeleid, en beteekent *ondeelbaar*.

7. **Meten, nonius.** — Tot het meten van lengte-uitgebreidheden bedient men zich gewoonlijk van den *meter* of *Nederlandsche el*, aan welke men getracht heeft de lengte te geven van een veertigmillioenste gedeelte van den meridiaan der aarde, hoewel het later bij naauwkeuriger berekening gebleken is, dat de aardmeridiaan eigenlijk 40,003,223 van die ellen bevat. Bij het meten gebruikt en meestal eene staaf, waarop de onderdeelen der el, palmen, duimen, strepen aangeteekend zijn. Het laat zich echter gemakkelijk inzien, dat men door meting zelfs met eene zeer naauwkeurig verdeelde staaf, geene uiterst naauwkeurige metingen kan doen. Van de verschillende werktuigen, die men heeft uitgedacht, om met juistheid ook onderdeelen van strepen te meten, zullen wij alleen den *nonius* of *vernier* (1) verklaren. Deze toestel bestaat uit twee linialen, waarvan de grootste A B (Fig. 1) in gelijke deelen, bijv. in strepen, verdeeld is, terwijl de andere kleinere C D daar langs kan glijden. Deze, die eigenlijk de nonius is, moet ook verdeeld worden, maar zijne verdeelingen moeten kleiner zijn dan die van de schaal A B. Neemt men bijv. 9 deelen van deze schaal, en verdeelt men die in 10 gelijke deelen, dan zal elk dier deelen $^{9}/_{10}$ bedragen van een deel der schaal A B, dus, zoo dit strepen zijn, $^{9}/_{10}$ streep; duidelijkheidshalve zijn de verdeelingen in de figuur grooter dan eene streep genomen. De afstand van de eerste verdeeling op de schaal tot de eerste deellijn op den nonius is dus $^{1}/_{10}$ streep; van de tweede deellijn op den nonius tot de tweede deellijn op de schaal $^{2}/_{10}$ streep, enz., zoo als door de bijgeschrevene getallen op den nonius wordt aangewezen. Wil men nu de lengte van een staafje M N naauwkeurig bepalen, dan plaatse men dit zoodanig, dat het eene uiteinde M overeenkomt met het nulpunt van de schaal, terwijl tegen het andere uiteinde N de nonius aangebragt wordt. Men ziet op de schaal, dat de lengte van het staafje M N meer dan 4 strepen bedraagt; de onderdeelen worden door den nonius op de volgende wijze aangewezen. Men neemt namelijk waar, welke deellijn op den nonius met eene deellijn van de schaal zamenvalt; hier zal het de 7e zijn. Daar nu de deelen op den nonius $^{1}/_{10}$ streep kleiner zijn, dan die op

Fig. 1.



(1) Dit werktuig wordt algemeen *nonius* genoemd naar Nonius of Nunnez, professor te Coïmbra, die het in 1550 uitvond. In Frankrijk noemt men het *vernier* naar den wiskundige van dien naam, die er in 1631 eenige verbeteringen aanbragt.

de schaal, zoo zal, als men van den regter- naar den linkerkant terugkeert, de afstand der eerstvolgende streepjes op de schaal en den nonius $^1/_{10}$ streep bedragen, van de daarop volgende streepjes $^2/_{10}$, en zoo verder; zoodat men bevindt, dat de afstand van het nulpunt van den nonius, dat tevens het uiteinde van M N is, tot de 4^e verdeeling op de schaal juist $^7/_{10}$ van eene streep bedraagt. De lengte van het staafje M N bedraagt dus 4,7 streep, wordende het aantal tiendedeelen dus eenvoudig aangewezen door het cijfer bij de eerste deellijn op den nonius, die met eene deellijn op de schaal zamenvalt.

Met den nonius zoo als hij hier beschreven is, kan men tiendedeelen van een streep meten. Bekwame instrumentmakers kunnen echter de naauwkeurigheid nog veel grooter maken. Zoo kan men bijv. eene schaal verdeelen in halve strepen; neemt men dan op den nonius 49 dier deelen, en verdeelt die lengte in 50 gelijke deeltjes, dan zal elk $^{49}/_{50}$ van een deel op de schaal bedragen; het verschil van de deelen op den nonius en op de schaal bedraagt dan $^1/_{50}$ deel van laatstgenoemde, dus $^1/_{100}$ streep. Om op zoodanigen nonius echter juist waar te nemen, welke verdeelingen zamenvallen, moet men zich van een vergrootglas bedienen, daar de deellijntjes uiterst fijn gegraveerd moeten zijn.

Men kan den nonius ook toepassen bij verdeelde cirkelbogen. Is bijv. een cirkelboog verdeeld in halve graden, en is op den nonius een boog van 29 dier halve graden in 30 gelijke deelen verdeeld, dan is de afstand van de eerste deellijntjes op de schaal of rand en op den nonius na de zamenvallende $^1/_{30}$ van een halven graad of 1′; men zal dus met behulp van zoodanig werktuig cirkelbogen en hoeken tot op eene minuut naauwkeurig kunnen meten.

8. **Poreusheid.** — Eene tweede algemeene eigenschap dér ligchamen bestaat daarin, dat zij de ruimte, welke zij schijnen in te nemen, niet geheel vullen, maar dat zich tusschen de deeltjes en atomen ledige tusschenruimten bevinden. Bij sommige ligchamen, zoo als spons, eenige houtsoorten, enz. zijn die *poriën* gemakkelijk waar te nemen. Bij andere kan men zich door eene eenvoudige proef er van overtuigen. Werpt men bijv. een stuk krijt in het water, dan ziet men luchtbelletjes uit het krijt opstijgen, terwijl het water er in trekt. Houdt men een stuk broodsuiker in eene vloeistof, dan zal deze terstond door het geheele stuk dringen, hetgeen niet zoude kunnen geschieden, indien er tusschen de deeltjes geene openingen of kanalen waren, waardoor de vloeistof haren weg kon vinden. Dat ook metalen poriën hebben, kan onmiddelijke waarneming, zelfs bij de aanzienlijkste vergrooting, ons niet leeren. Toen echter in 1661 eenige natuurkundigen te Florence trachtten te bewijzen, dat water niet kon zamengeperst worden, en te dien

einde een hollen gouden bal met water gevuld en daarna gesloten hadden, stelden zij dien aan eene sterke drukking bloot, en zagen weldra het water door den bal heen komen. Later hebben proeven met verschillende metalen aangetoond, dat zij te zamen gesmolten zijnde eene geringere ruimte beslaan dan voorheen. Dit kan niet geschieden, tenzij poriën van het eene metaal door deeltjes van het andere gevuld worden. Voor glas is de porositeit nog niet regtstreeks aangetoond. Daar echter deze stof, even als andere ligchamen, de eigenschap heeft van door de werking der warmte zich uit te zetten, dat is, een grooter volume aan te nemen, en men niet mag onderstellen, dat de atomen zelven grooter worden, zoo kan de vermeerdering van het volume alleen aan eene vergrooting der poriën toegeschreven worden.

9. **Uitzetbaarheid en zamenpersbaarheid.** — Daar alle ligchamen de eigenschap hebben van, binnen zekere grenzen, door toenemende warmte zich uit te zetten, en daarentegen door koude, of ook wel door sterke drukking, een kleiner volume te beslaan, zoo kan men ook de uitzetbaarheid en zamenpersbaarheid onder de algemeene eigenschappen rangschikken. Deze staan bovendien in een naauw verband met de poreusheid, van welke zij de gevolgen zijn; want wanneer een ligchaam zich uitzet of zamengeperst wordt, dan zijn het niet de atomen, maar wel hunne tusschenruimten of poriën, welke grooter of kleiner worden.

10. **Beweging, rust.** — Alle ligchamen zijn beweegbaar, dat is, zij kunnen van de eene plaats naar eene andere vervoerd worden; die verandering van plaats noemt men beweging; verandert een ligchaam zijne plaats niet, dan zegt men dat het in rust is. Om te beoordeelen of een ligchaam in rust of in beweging is, moet men de plaats, welke het inneemt, gedurende eenigen tijd vergelijken met de plaats waarop zich andere voorwerpen bevinden. Het zal menigmaal gebeuren, dat een ligchaam ten opzigte van sommige voorwerpen in beweging is, terwijl het, met andere vergeleken, in rust schijnt te zijn. Over *volstrekte rust* of *beweging* is het niet mogelijk te oordeelen; althans er is geen enkel voorwerp in het heelal bekend, dat eene volstrekte rust geniet; en beweging kan alleen dàn volstrekt genoemd worden, als men het ligchaam vergelijkt met een ander, dat zich in volstrekte rust bevindt. Indien wij dus een ligchaam in rust zien ten opzigte van andere, dan is die rust slechts betrekkelijk, daar het tevens in vergelijking met andere in beweging kan zijn. Zoo zal bijv. iemand die in een schip zit, in rust kunnen zijn ten opzigte van het schip zelf, doch in betrekking tot de oevers van de rivier is hij in beweging. Die oevers, hoewel schijnbaar in rust, zijn toch in beweging, daar zij met de geheele aarde hare dagelijksche beweging om hare as deelen, zoo-

wel als hare jaarlijksche beweging om de zon. De sterrekunde leert ons, dat ook de zon niet in rust is, maar zoowel eene voortgaande beweging in de ruimte, als eene draaijende om hare as bezit.

11. **Inertie.** — Een ligchaam, dat in rust is, kan niet uit zich zelf, zonder uitwendige oorzaak, in beweging geraken; een ligchaam dat in beweging is, kan evenmin die beweging wijzigen of tot rust komen, zonder dat zulks door eene werking buiten het ligchaam veroorzaakt wordt. Wel is waar neemt men in de natuur verschijnselen waar, die schijnbaar met deze eigenschap der stof in strijd zijn; maar men zal zich ligt kunnen overtuigen, dat de verandering steeds de eene of andere oorzaak heeft, welke men niet onmiddelijk waarneemt. Als men een bal over den grond laat voortrollen wordt zijne beweging steeds langzamer, en komt hij ten laatste in rust; de oorzaak hiervan is de tegenstand, door de ongelijkheden van den grond veroorzaakt. Laat men een bal uit de hand los, dan valt hij ter aarde; het schijnt dan, alsof hij van zelf in beweging geraakt; doch men zal ligt inzien, dat de zwaarte van den bal hem in beweging brengt, hetgeen onmogelijk was, zoolang de hand hem vasthield; men heeft dus slechts de hinderpalen voor de beweging weggenomen. Staat iemand in een bootje, op het oogenblik dat het tegen den oever aanstoot, dan zal hij ligtelijk vallen. Zijn ligchaam deelde de beweging van het bootje, en behoudt dus die beweging; zijne voeten evenwel, die op het bootje rusten, kunnen de beweging van het ligchaam niet terstond volgen, en hij valt naar den oever toe.

Door deze en een onnoemelijk aantal dergelijke verschijnselen vindt men overal de wet bevestigd, dat de ligchamen de eigenschap hebben, van in den toestand van rust of van beweging, waarin zij zich bevinden, te volharden, tot dat eene uitwendige oorzaak daarin verandering brengt. Deze eigenschap wordt gewoonlijk *inertie* genoemd, een vreemd woord dat men het best door *werkelooshcid* zoude kunnen vertalen. (1)

12. **Zwaarte.** — Wij hebben zoo even reeds de opmerking gemaakt, dat als men een voorwerp uit de hand loslaat, het neêrvalt tot op den grond of tot een ander ligchaam, dat het tegenhoudt. De oorzaak van dit verschijnsel is de zwaartekracht, dat is, de kracht die alle ligchamen een streven geeft, om zich naar de aarde te bewegen. Zijn er dus geene hinderpalen, dan zal het ligchaam vallen; doch ook dan, wanneer dit vallen door de eene of

(1) Men geeft aan de inertie somtijds den naam van *traagheid*, welke uitdrukking echter ligt tot eene verkeerde opvatting kan aanleiding geven. *Volhardings-vermogen* zoude beter zijn, zoo men de inertie een vermogen noemen konde; doch zij is slechts eene eigenschap, welke juist gebrek aan vermogen uitdrukt.

andere reden verhinderd wordt, zijn toch nog de ligchamen aan de zwaartekracht onderworpen, dat is, zij zijn zwaar. De rigting der zwaartekracht bepaalt men door het schietlood, bestaande uit een klein zwaar ligchaam, dat vrij aan eenen draad hangt. De rigting van het schietlood, die dus tevens die van de zwaartekracht aanduidt, noemt men *vertikaal.*

De oppervlakte van stilstaand water moet, zoo als later blijken zal, loodregt zijn op de rigting der zwaartekracht, en wordt *horizontaal* genoemd. Deze oppervlakte is niet volkomen vlak, maar gebogen; zij komt overeen met het oppervlak der aarde, niet zoo als dit inderdaad is met al hare oneffenheden, maar met een denkbeeldig oppervlak, gevormd door de oppervlakte der zee, die men zich onder het vasteland verlengd voorstelt. De rigting der zwaartekracht is op elke plaats der aarde verschillend, daar zij steeds naar het middenpunt der aarde gerigt is. Op twee plaatsen, die digt bij elkander gelegen zijn, zal men evenwel dit onderscheid in rigting niet bemerken, evenmin als men de bolvormige gedaante der aarde onmiddelijk kan waarnemen; de oorzaak daarvan is, dat de afstand van twee zoodanige plaatsen uiterst gering is in vergelijking der aarde zelve, die eene middellijn heeft van meer dan 12 millioen ellen.

Een ligchaam, dat door de eene of andere oorzaak belet wordt, aan de werking der zwaartekracht te gehoorzamen en te vallen, oefent eene drukking uit op het voorwerp, waardoor het wordt teruggehouden. Die drukking, die afhankelijk zijn moet van het aantal moleculen, waaruit het ligchaam bestaat, en dus tegelijk daarmede moet toenemen, wordt *gewigt* genoemd. Daar alle ligchamen aan de werking der zwaartekracht onderworpen zijn, en alle dus ook gewigt hebben, behoort deze eigenschap evenzeer onder de algemeene eigenschappen der stof gerekend te worden. De vergelijking van het gewigt van verschillende ligchamen noemt men *wegen.* Als eenheid heeft men daarbij aangenomen het gewigt van 1 kubieke duim zuiver water van zoodanigen warmtegraad, dat zijne moleculen het digtst mogelijk bij elkander zijn geplaatst; die eenheid noemt men een *gramme* of wigtje; 1000 wigtjes vormen een *kilogramme* of Nederl. pond.

De hoeveelheid stof van een ligchaam noemt men zijne *massa;* uit hoe meer stofdeeltjes of moleculen een ligchaam dus is zamengesteld, des te meer massa zal het bevatten. Brengt men dit in verband met de bepaling, die wij van gewigt gegeven hebben, dan zal men terstond daaruit kunnen afleiden, dat de massa en het gewigt van een ligchaam met elkander evenredig moeten zijn.

HOOFDSTUK II.

BIJZONDERE EIGENSCHAPPEN DER LIGCHAMEN.

A. PHYSISCHE VERSCHEIDENHEID.

13. **Digtheid.** — Bij de voorafgaande beschouwingen is de aandacht gevestigd op het meer of minder aantal moleculen, die in een ligchaam aanwezig zijn; het is echter niet alleen hun aantal, maar vooral ook hun aard, die van het hoogste belang is; verscheidenheid in dit opzigt geeft tot eene groote afwisseling in de natuur aanleiding.

Het laat zich in de eerste plaats gemakkelijk inzien, dat verschillende stofdeeltjes een verschillend gewigt zullen hebben. Heeft men dus twee ligchamen van gelijk volume, dan kunnen die, hoewel uit een even groot aantal moleculen bestaande, toch in gewigt verschillen. De verhouding tusschen het gewigt en volume noemt men digtheid. Om deze voor elk ligchaam te kunnen uitdrukken, neemt men de digtheid van het water als eenheid aan. Men zoude dus kunnen zeggen, dat de digtheid van eene stof wordt uitgedrukt door een getal, dat aanwijst, hoeveel maal een bepaald volume dier stof zwaarder is, dan een gelijk volume water. Men noemt dit getal gewoonlijk het *soortelijk gewigt* dier stof; en daar een kub. duim water een wigtje, of eene kub. palm een pond weegt, zoo drukt het soortelijk gewigt terstond het aantal wigtjes of ponden uit, welke een kub. duim of een kub. palm eener stof weegt. Noemt men het soortelijk gewigt S, het volume van een ligchaam V, en zijn gewigt P, dan zal dus

$$V = \frac{P}{S},\ S = \frac{P}{V}.$$

Hoewel men dus, om het soortelijk gewigt van eene stof te bepalen, slechts gelijke volumen van die stof en van water met elkander behoeft te vergelijken, zoo is zoodanige vergelijking praktisch aan velerlei bezwaar onderhevig. Wij zullen later eenvoudiger middelen leeren kennen, om die bepalingen te doen plaats vinden.

14. **Aggregatietoestanden.** — De aard der ligchamen is echter niet alleen afhankelijk van den aard der moleculen of atomen, maar ook van de wijze, waarop die naast of bij elkander geplaatst of gegroepeerd zijn. De ver-

schillende wijzen, waarop dit geschieden kan, geeft aanleiding, om de ligchamen in drie groote afdeelingen te verdeelen, en ze in *vaste*, *vloeibare* en *gasvormige* te onderscheiden.

Vaste ligchamen hebben een onveranderlijk volume en eene zelfstandige gedaante; hunne deeltjes laten zich niet dan met eene zekere kracht van elkander scheiden.

Vloeibare ligchamen hebben evenzeer als de vaste een onveranderlijk volume, doch geene zelfstandige gedaante; zij nemen integendeel de gedaante aan van het vat, waarin zij besloten zijn. Hunne deeltjes kunnen met eene uiterst geringe kracht van elkander gescheiden worden.

Gasvormige ligchamen eindelijk hebben een zeer veranderlijk volume en geene zelfstandige gedaante, daar zij gemakkelijk tot op een veel kleiner volume kunnen worden zamengeperst, en ook omgekeerd eene veel grootere ruimte kunnen vervullen. Even als bij de vloeistoffen laten de deeltjes zich gemakkelijk van elkander scheiden; ja, zij hebben zelfs een streven om zich steeds van elkander te verwijderen, en schijnen elkander af te stooten.

Dat deze verschillende toestanden zouden moeten worden toegeschreven aan den aard van de atomen, mag niet ondersteld worden. Neemt men toch in aanmerking, dat er ligchamen zijn, die in drie verschillende toestanden voorkomen, zoo als water, dat als ijs een vast ligchaam, als water vloeibaar, en als damp of stoom gasvormig is, dan zoude men eene verandering van den aard der atomen moeten aannemen, als die ligchamen van den eenen tot den anderen dier toestanden overgaan. Daar dit echter strijdig zoude zijn met het begrip, dat wij ons van atomen gemaakt hebben, moeten wij wel onderstellen, dat zij anders nevens elkander geplaatst, anders geaggregeerd zijn. Men noemt deze drie verschillende toestanden daarom ook aggregatietoestanden.

Behalve het water zijn er meer stoffen bekend, die in de drie aggregatietoestanden hetzij in de natuur voorkomen, hetzij door mechanische of andere middelen kunnen gebragt worden. Kwikzilver is bijv. in den gewonen toestand vloeibaar, bij eene sterke koude wordt het vast, en aanzienlijk verhit wordt het gasvormig. De Fransche natuurkundige Despretz heeft in den laatsten tijd sommige ligchamen, die men slechts in één of twee aggregatietoestanden kende, in alle drie daargesteld. Het is niet onwaarschijnlijk, dat alle ligchamen in die drie verschillende toestanden kunnen voorkomen, maar dat onze beperkte middelen niet toelaten de omstandigheden te voorschijn te roepen, die voor den overgang van den eenen in eenen anderen vereischt worden.

De gasvormige ligchamen worden dikwijls onderscheiden in dampen en gassen, naar gelang zij al of niet in den vloeibaren staat kunnen verkregen worden. Zuurstof bijv. is een gas, omdat men het niet in een anderen dan in den gas-

vormigen toestand kent; stoom of waterdamp daarentegen een damp, omdat hij vloeibaar kan worden. Men zal echter ligt inzien, dat zoodanig onderscheid moeijelijk vol te houden is; vele gasvormige ligchamen, vroeger voor zoogenaamde permanente gassen gehouden, zijn in den laatsten tijd in vloeibaren of vasten staat daargesteld.

15. **Moleculaire krachten.** — Wanneer men aanneemt dat de verschillende aggregatietoestanden in verband staan met de wijze, waarop de atomen naast elkander zijn geplaatst, dan is het toch nog onmogelijk, bepaald aan te wijzen, welke de oorzaken zijn, waarom de ligchamen juist in dezen of geen toestand voorkomen, daar alles wat men van de inwendige geaardheid der stof weet, slechts op gissing berust. Men kan zich echter het best rekenschap der verschijnselen geven, wanneer men aanneemt, dat in de atomen, waaruit een ligchaam is zamengesteld, in de eerste plaats eene kracht huisvest, die ze tot elkander tracht te brengen, dus eene *aantrekkende kracht;* en in de tweede plaats eene andere kracht, die de eerste tegenwerkt, en dus eene *afstootende kracht* moet zijn. Heeft nu in een ligchaam de aantrekkingskracht, die tusschen de kleinere deeltjes werkzaam is, de bovenhand, dan zal het moeijelijk zijn ze van een te scheiden, en het ligchaam is dus vast. Is de afstootende kracht grooter dan de aantrekkingskracht, dan hebben de deeltjes een streven om zich van elkander te verwijderen; het ligchaam is dus gasvormig. Zijn eindelijk die beide krachten even groot, zoodat zij elkander vernietigen, dan zal het ligchaam eene vloeistof zijn, waarvan de deeltjes geenen merkbaren zamenhang, maar ook geene verwijdering van elkander toonen.

Krachten, zoo als die welke hier vermeld zijn, en die werkzaam zijn tusschen de stofdeeltjes of atomen van een zelfde ligchaam, noemt men gewoonlijk moleculaire krachten. Deze werken alleen op zeer geringe afstanden, bij nagenoeg onmiddellijke aanraking der deeltjes, en moeten dus wel onderscheiden worden van de krachten, zoo als zwaartekracht, magneetkracht, en vele andere, welke wij later zullen leeren kennen, die op grootere afstanden werken.

16. **Cohaesie.** — De kracht, waarmede de deeltjes bij vaste ligchamen aan elkander kleven, noemt men gewoonlijk cohaesie, of kracht van zamenhang. Deze heeft haren oorsprong in de onderlinge aantrekking der deeltjes; moest men niet tevens, zoo als wij zagen, tusschen deze eene onderlinge afstooting aannemen, dan zoude de cohaesie niets anders wezen, dan de aantrekkingskracht; thans echter moet men haar beschouwen als het gevolg van de beide moleculaire krachten, zoowel de afstootende als de aantrekkende, van welke echter de laatste bij de vaste ligchamen steeds de eerste overtreft. Dat de cohaesie niet bij alle vaste ligchamen even groot is, daarvan kan men

zich gemakkelijk overtuigen. Terwijl bijv. de deeltjes van een stuk was zeer gemakkelijk van elkander gescheiden worden, is zulks bij het lood veel moeijelijker, en bij ijzer niet dan door buitengewone krachten mogelijk.

17. **Elasticiteit.** — Voordat de zamenhang door den invloed van mechanische middelen nog geheel verbroken is, kunnen evenwel de deeltjes ten opzigte van elkander reeds eene verplaatsing hebben ondergaan, en dus de vorm van het ligchaam eenigzins veranderd zijn. Zoolang de uitwendige kracht, welke van die verplaatsing der deeltjes oorzaak was, blijft werken, zal het ligchaam ook den nieuwen vorm, dien het aangenomen heeft, blijven behouden; maar wat zal er gebeuren, wanneer de werking van die uitwendige kracht ophoudt? Zullen de deeltjes ook dan nog hunne nieuwe plaats behouden, of zullen zij de vorige hernemen? De ervaring leert, dat dit geheel afhankelijk is zoowel van den aard der stof, waaruit het ligchaam bestaat, als van de grootte der uitwendige krachten, die er op werken. Nemen wij bijv. eene stalen veêr, en buigen wij die een weinig, dan zal zij, als wij ze loslaten, haren vroegeren vorm hernemen. Eene balein zal, na eene geringe buiging, hare vorige gedaante herkrijgen; buigen wij ze daarentegen sterk, dan behoudt zij eene bogt. Hetzelfde is het geval met een vel papier, een rietstok, enz. Terwijl bij sommige ligchamen de verplaatsing der deeltjes reeds blijvend is, al is de uitwendige invloed ook zeer gering geweest, zal bij andere zelfs eene aanzienlijke kracht nog geene blijvende verandering in den vorm kunnen bewerken. Die kracht nu, waarmede de ligchamen hunnen vroegeren vorm trachten te hernemen, wanneer zij door eene uitwendige en gedurende korten tijd werkende kracht dien verloren hebben, noemt men *veêrkracht* of *elasticiteit*. Een ligchaam zoude volkomen veêrkrachtig zijn, als het naauwkeurig zijne vorige gedaante weder aannam, hoe groot ook de kracht was geweest, die van de vormsverandering oorzaak was, en hoe lang die kracht ook gewerkt had. Daarom kan men ook geen ligchaam volkomen veêrkrachtig noemen, daar de ervaring leert, dat men elk ligchaam eene blijvende vervorming kan doen ondergaan, mits men de daarop werkende kracht slechts groot genoeg neemt. Daarentegen is er geen ligchaam, of het bezit eenige veêrkracht; aan zijne deeltjes zal men door eene zeer geringe kracht eene soms naauw merkbare verplaatsing kunnen doen ondergaan, die na de verwijdering der kracht weder ophoudt. Elk ligchaam zal zich dus ten opzigte van krachten, die eene bepaalde grootte niet te boven gaan, als volkomen veêrkrachtig voordoen; de grootte dier kracht, waarvan de minste vermeerdering voldoende zoude zijn, om het ligchaam eene blijvende vervorming te geven, noemt men daarom zeer eigenaardig de *grens der elasticiteit*.

De meest veêrkrachtige ligchamen zijn caoutchouc (elastieke gom), darmsnaren, ivoor, staal, enz. Van de elasticiteit van ivoor kan men zich door eene eenvoudige proef overtuigen. Als men een ivoren bal op eene zwart gemaakte marmeren of steenen plaat laat vallen, dan zal men daar, waar hij met de plaat in aanraking is geweest, eene ronde zwarte plek waarnemen, zonder dat men aan de gedaante van den bal eene verandering kan bemerken. Dit is een bewijs, dat de bal aanzienlijk is ingedrukt geworden, doch dat de deeltjes terstond hunnen vorigen stand weder hebben ingenomen. Minder veêrkrachtig daarentegen is glas, want tracht men de deeltjes eene niet zeer kleine verplaatsing te doen ondergaan, door het bijv. te buigen, dan breekt het; evenzoo lood, dat wel niet breekt, maar buigt. Bij sommige ligchamen is de cohaesie zoo sterk, dat men niet dan met groote kracht de deeltjes door een of ander werktuig van elkander kan verwijderen. Zoodanige ligchamen noemt men *hard;* laten zich de deeltjes gemakkelijk van een scheiden, dan heet het *week.* Het hardste van alle bekende ligchamen is de diamant; daarom kan men met den scherpen kant van een diamant in alle andere ligchamen krassen maken. Hardheid en veêrkracht kunnen gepaard gaan, maar zulks is geen vereischte. Staal bijv. heeft beide eigenschappen, glas alleen de eerste; daarentegen kunnen weeke ligchamen zeer elastisch zijn, zooals caoutchouc. De hardheid van een ligchaam kan ook door bijzondere omstandigheden aanmerkelijk gewijzigd worden. Door hameren, pletten, uitrekken en dergelijke bewerkingen worden de meeste metalen harder gemaakt. De warmte oefent ook een grooten invloed daarop uit. De meeste verliezen hunne hardheid, als zij sterk verwarmd worden, en gaan bij toenemende warmte zelfs tot den vloeibaren toestand over; bij bekoeling herkrijgen sommige hunne hardheid, andere niet. Veelal hangt dit daarvan af, of de bekoeling plotseling of langzaam plaats heeft, doch een vaste regel kan hiervoor niet worden opgegeven. IJzer en staal worden door langzaam afkoelen week, door schielijk afkoelen, bijv. door indompeling in water of olie, harder. Daarentegen wordt het zoogenaamde *tam-tam*, een mengsel uit 7 deelen koper en 2 deelen tin bestaande, bij langzame afkoeling zeer hard, doch bij plotselinge afkoeling week. Het zamensmelten van twee of meer metalen kan aan het mengsel ook eene hardheid geven, zeer verschillend van die der zamengesmoltene stoffen. Geelkoper is weeker dan roodkoper en zink, waaruit het bestaat; wordt daarentegen roodkoper met het vrij weeke tin zamengesmolten in de verhouding van 5 tot 1, dan krijgt men het veel hardere klokkenmetaal; voegt men er nog meer tin bij, zoodat de verhouding wordt als 2 tot 1, dan ontstaat het nog hardere spiegelmetaal.

Sommige ligchamen verliezen terstond hunnen zamenhang, wanneer hunne deeltjes tot over de grens der elasticiteit verplaatst worden; in dit geval noemt

men ze *broos*, zooals glas, porselein. De meeste harde ligchamen hebben tevens deze eigenschap. Ligchamen wier vorm men kan veranderen, zonder den zamenhang te verbreken, noemt men *buigzaam*, zooals balein, riet; *taai*, zooals leder, en ook enkele metalen, bijv. roodkoper; *smeedbaar* of *rekbaar*, zooals goud, zilver, lood en bovenal platina.

18. **Vastheid.** — De verplaatsing der deeltjes van vaste ligchamen kan op zeer verschillende wijzen geschieden, naar gelang van den aard der uitwendige krachten, die ze veroorzaken. Die krachten kunnen namelijk eene uitrekking, eene zamendrukking, eene buiging of eene wringing ten gevolge hebben. De kracht waarmede het ligchaam aan zoodanige werking wederstaat, wordt zijne vastheid of *wederstand* genoemd. Het ligt in den aard dar zaak, dat de wederstand van een ligchaam zeer verschillend kan zijn, naar gelang het aan de eene of de andere der bovengenoemde werkingen is blootgesteld. Eene naauwkeurige beschouwing van deze verschillende gevallen behoort meer tot het gebied der werktuigkunde; wij bepalen ons dus tot eene korte vermelding van de voornaamste resultaten en wetten, die daarop betrekking hebben.

Wanneer de aangebragte kracht werkt in de rigting van de lengte der staaf, hetzij om ze uit te rekken, hetzij om ze zamen te drukken, dan zijn binnen de grens der veêrkracht de uitrekkingen of zamendrukkingen evenredig aan de uitrekkende of zamendrukkende krachten, alsmede aan de lengten der staven, doch omgekeerd evenredig aan hare dwarsdoorsneden. Is L de lengte, D de inhoud der dwarsdoorsnede, l de uitrekking of zamendrukking, teweeggebragt door eene kracht of een gewigt P, dan is

$$l = \frac{P\,L}{D\,E}, \quad P = \frac{l}{L}\,D\,E$$

in welke formulen E een coëfficient is, afhankelijk van de stof, waaruit de staaf bestaat, en die gewoonlijk *modulus van volstrekte veêrkracht*, of ook wel elasticiteits-coëfficient, genoemd wordt. Stelt men in deze formule $D = 1$, $l = L$, dan wordt $E = P$. Deze coëfficient duidt dus de kracht aan, die noodig zoude wezen, om de staaf tot hare dubbele lengte uit te rekken, wel te verstaan, indien zulks mogelijk ware. De breuk $\frac{l}{L}$ stelt de uitrekking of zamendrukking voor op de eenheid van lengtemaat.

Bij vermeerdering van kracht zal men het zoover kunnen brengen, dat niet alleen de staaf boven de grens der veêrkracht wordt uitgerekt, (in welk geval de zamenhang der deeltjes zonder twijfel reeds eenige wijziging zal ondergaan hebben), maar dat zelfs de zamenhang geheel verbroken wordt, en de staaf

breekt. De kracht, die noodig is om eene staaf, die de eenheid van vlaktemaat tot doorsnede heeft, aldus te breken, wordt *modulus van vastheid* genoemd.

De wederstand bij het uitrekken wordt, om hem te onderscheiden van dien bij het buigen of wringen, gewoonlijk *volstrekte* vastheid of wederstand genoemd.

Vele proeven zijn er geschied, om deze grootheden voor verschillende stoffen te bepalen. De voornaamste zijn die, welke door Musschenbroek (1729), Barlow (1815), Tredgold (1824), Wertheim (1844) en anderen genomen zijn. In de volgende tabel zijn eenige der resultaten zamengevat. De eerste kolom bevat de uitrekking op het oogenblik, dat de grens der elasticiteit bereikt is, de tweede den modulus van volstrekte veêrkracht, de derde de kracht die noodig is om de staaf te breken, beide in Ned. ponden uitgedrukt, en voor eene dwarsdoorsnede van 1 vierkante duim.

Namen der ligchamen.	Uitrekking bij de grens der veêrkracht.	Modulus van volstrekte veêrkracht. *E*.	Modulus van volstrekte vastheid.
Beukenhout, eikenhout, dennenhout in de rigting der vezels	$\frac{1}{600}$	110000	650
Gesmeed ijzer	$\frac{1}{1330}$	2000000	4000
Gegoten ijzer	$\frac{1}{1300}$	950000	1100
Rood koper.	$\frac{1}{4000}$	1000000	3000
Geel koper	$\frac{1}{1320}$	1630000	1200
Lood	$\frac{1}{577}$	50000	130
Zink	$\frac{1}{11000}$	800000	1300
Tin	$\frac{1}{600}$	400000	3500
Zilver.	$\frac{1}{660}$	730000	2900
Goud	$\frac{1}{600}$	800000	2700
Platina	$\frac{1}{600}$	1600000	3400
Glas	$\frac{1}{2200}$	700000	140

Men moet echter in de praktijk als regel aannemen, van de ligchamen nimmer bloot te stellen aan eene kracht, grooter dan de helft, of bij houtsoorten een derde van die, welke het breken zoude ten gevolge hebben. Het zal zelfs wenschelijk zijn geene kracht aan te wenden, welke eene uitrekking veroorzaakt, grooter dan die, welke bij de grens der veêrkracht behoort. De grootte dezer kracht wordt blijkens bovenstaande formule, voor staven ter dikte van 1 vierkante duim, uitgedrukt door het produkt der getallen in de twee eerste kolommen.

Aan plantenvezels kan men, door ze zamen te lijmen, eene groote vastheid

geven. Zamengelijmde hennepvezels, ter doorsnede van 1 vierk. duim, kunnen 8000 pond dragen alvorens te breken.

Van nog meer belang in de praktijk is de wederstand van staven, waarop loodregt op de lengte krachten werken. Zoodanige staaf kan aan één uiteinde, aan beide uiteinden, of in het midden ondersteund zijn; in alle deze gevallen zal zij eene buiging ondergaan, en het is van belang, dat ook hier de grens der veêrkracht niet overschreden wordt. Wij kunnen hier niet in de vrij ingewikkelde wiskundige beschouwingen treden, welke tot de wetten van deze veêrkracht of wederstand, meestal *betrekkelijke* of buigings-wederstand genoemd, leiden. Zij staan in een naauw verband met de volstrekte veêrkracht of wederstand bij uitrekking, waarvoor wij de wetten hebben opgegeven. De resultaten der theorie, door proeven bevestigd, komen hoofdzakelijk daarop neêr, dat, wanneer eene horizontale prismatische staaf aan haar eene uiteinde bevestigd is, terwijl aan het andere uiteinde gewigten zijn aangebragt, de kracht, vereischt om ze door te breken, wordt voorgesteld door de formule

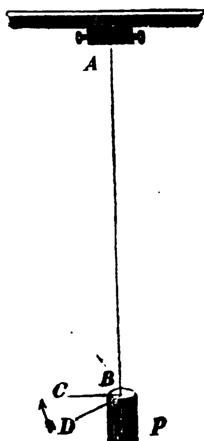
$$R = K \frac{b\,h^2}{6\,L},$$

waarin K de volstrekte weêrstand voor eene staaf, waarvan de dwarsdoorsnede een vierkante duim bedraagt, en dus gevonden wordt in de laatste kolom der tabel op bladz. 17, b de breedte der staaf, h hare hoogte of dikte, en L hare lengte. De tot doorbreken vereischte kracht is dus evenredig aan de breedte en aan het vierkant der dikte, maar omgekeerd evenredig aan de lengte.

Rust de staaf in haar midden, en is het gewigt gelijkelijk tusschen de twee uiteinden verdeeld, dan is er aan elk uiteinde eene kracht $2\,R$ noodig. Rust zij daarentegen op hare beide uiteinden, en is de belasting in het midden aangebragt, dan moet deze $4\,R$ wezen. Is zij aan de uiteinden vastgemaakt, in plaats van slechts te rusten, zoodat zij brekende eigenlijk in drie punten breekt, namelijk in het midden en aan de beide punten waar zij bevestigd is, dan wordt eene kracht $8\,R$ vereischt.

Voor de eigenlijke natuurkunde is van meer belang dan de voorgaande de kennis van de *wring-* of *torsiekracht*, dat is, de veêrkracht ontwikkeld wanneer eene cilindrische staaf om hare lengte-as gedraaid of gewrongen wordt. De wetten van deze kracht zijn naauwkeurig onderzocht door Coulomb (1785), door aan een metalen draad van bepaalde dikte en lengte, welks eene uiteinde bij A (fig. 2) vastgeklemd was, een gewigt P op te hangen, en dit om zijne loodregte as om te draaijen; wordt het dan weêr aan zich zelf overgelaten, dan zal door het streven der verplaatste deeltjes van den metaaldraad, om hunnen vorigen stand te hernemen, het gewigt zijnen vroegeren stand terug

Fig. 2.



krijgen, doch, door de inertie nog verder omdraaijende, in schommelingen geraken. Door waarneming der grootte en duur dezer schommelingen is Coulomb tot het besluit gekomen, dat de wringkracht, dat is, de kracht waarmede de draad tot zijnen oorspronkelijken stand tracht terug te keeren, evenredig is aan den hoek der omdraaijing CBD, of, zoo als men het gewoonlijk noemt, den hoek van torsie, mits men binnen de grenzen der elasticiteit blijft. Op grond van deze eigenschappen heeft Coulomb een werktuig zamengesteld, geschikt om kleine krachten te meten, dat wij later zullen leeren kennen.

De voornaamste toepassingen die van de veêrkracht gemaakt worden, zijn de veêren in de uurwerken, die onder de voertuigen, enz. Het gebruik van den handboog berust eveneens op de veêrkracht. Bij sommige oorlogswerktuigen der ouden, zoo als de ballista en catapulten, maakte men gebruik van deze kracht, om zware voorwerpen op groote afstanden te werpen. Eene der belangrijkste toepassingen zijn de zoogenaamde *krachtmeters* of *dynamometers*. Fig. 3 en 4 stellen zoodanige werktuigen voor in hunne eenvoudigste gedaante. In fig. 3 is A een stalen veêr, aan welks beide beenen in B en C cirkelbogen bevestigd zijn, waarvan elke gaat door eene opening in het andere been. Maakt men dezen toestel in D vast, en hangt men in E een gewigt op, dan wordt de veêr BAC door dat gewigt zamengedrukt, de boog BG gaat door de opening bij G, de boog CH door de opening H in het been AB, totdat dit bij eene der verdeelingen van CH staan blijft. Daar grootere gewigten meerdere zamendrukking zullen ten gevolge hebben, zal men bij de verschillende verdeelingen op CH de gewigten kunnen aanteekenen, die zoodanige zamendrukking ten gevolge hebben. Trekt men nu eenvoudig aan E, dan zal ook de veêr zamengedrukt worden, en de verdeeling, waarbij AB dan komt te staan, wijst in ponden de kracht aan, waarmede men getrokken heeft. De toestel in fig. 4 afgebeeld is geschikt om grootere krachten te meten. Aldaar is MANB de veêr, waarvan de punten A en B digter bij elkaar komen, als aan M en N getrokken

Fig. 3.

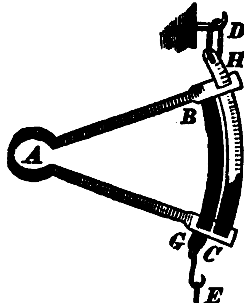
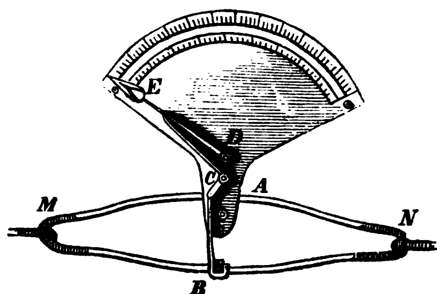


Fig. 4.



wordt. Men zal uit de figuur gemakkelijk kunnen begrijpen, hoe alsdan door het staafje C de wijzer D E bewogen wordt, die op den verdeelden cirkelboog de grootte der aangewende kracht zal aanwijzen. De tweede verdeelde cirkelboog dient om de kracht aan te wijzen, als men de punten A en B met de handen bijeen tracht te brengen. Deze dynamometer is door Regnier (1798) uitgedacht.

De veêrkracht of elasticiteit wordt dikwijls beschouwd als eene algemeene eigenschap der ligchamen. In die beteekenis, welke wij er aan gegeven hebben, is zij zulks echter niet. Alleen bij de vaste ligchamen nemen wij de eigenschap waar, dat de deeltjes hunne vorige plaats weder innemen, zoodra de oorzaak der verplaatsing ophoudt, wel te verstaan, indien de grens der veêrkracht niet overschreden is. Vloeistoffen zullen, zoo zij zamengedrukt zijn, wel daarna hun vorig volume terugkrijgen, maar niet denzelfden vorm, daar zij geen eigen vorm hebben. Gasvormige ligchamen zijn alleen in zooverre veêrkrachtig te noemen, als hunne deeltjes elkander afstooten, en dus, zamengedrukt zijnde, terstond na het ophouden dier zamendrukkende kracht zich weder over eene grootere ruimte verspreiden. Het is dus hoogstens eene veêrkracht tegen zamendrukking, welke men bij deze kan aannemen. De bij vaste ligchamen zoo opmerkelijke veêrkracht tegen uitrekking, buiging en wringing hebben de gassen niet.

19. **Adhaesie.** — Even als er tusschen de deeltjes van een ligchaam eene aantrekkende kracht bestaat, die wij als cohaesie hebben leeren kennen, zoo zal er ook eene aantrekkingskracht werkzaam kunnen zijn tusschen de stofdeeltjes van verschillende ligchamen; daartoe is het echter noodig, dat die deeltjes zoozeer in elkanders onmiddellijke nabijheid gebragt worden, dat die krachten, die blijkens het voorgaande slechts op uiterst geringe afstanden werken, zich kunnen uiten. De kracht, waarmede dan die twee ligchamen aan elkander hangen, noemt men *adhaesie*. Zij is te aanzienlijker, naarmate de oppervlakten der ligchamen gladder zijn, en de aanraking dus volkomener wordt gemaakt. Men kan zich van de kracht, waarmede gelijksoortige ligchamen aan elkander kunnen kleven, een denkbeeld maken, wanneer men twee gepolijste glazen platen, bijv. van spiegelglas, op elkander legt. Men zal ze niet van

elkander kunnen trekken, zonder gevaar van een van beide te breken. Bij lood, ijzer, marmer en andere stoffen is de adhaesie ook zeer aanzienlijk; maar goed gepolijste oppervlakken zijn steeds een voornaam vereischte.

De adhaesie heeft ook tusschen ongelijksoortige ligchamen plaats; men maakt er bijv. gebruik van om twee metalen aan elkander te pletten.

Niet alleen tusschen vaste ligchamen onderling, maar ook tusschen ligchamen van verschillende aggregatietoestanden, neemt men adhaesie waar, en zelfs zoo veel te meer, naarmate de zamenhang of cohaesie der deeltjes van een der beide ligchamen geringer is. Daarom is zij het grootst tusschen vaste ligchamen en luchtsoorten, geringer tusschen vaste en vloeibare, en het geringst tusschen vaste ligchamen onderling. De grootte der adhaesie laat zich gemakkelijk bepalen, door een der ligchamen, welke aan elkander kleven, aan den eenen arm eener balans te bevestigen, en in de schaal aan den anderen arm zoolang gewigten te plaatsen, tot zij van elkander gerukt worden. Op de adhaesie van vaste ligchamen tot vloeistoffen en gassoorten komen wij later terug.

Het sterkst werkt de adhaesie tusschen vaste ligchamen, wanneer een vloeibaar ligchaam met een vast in aanraking wordt gebragt, en eerstgenoemd door droogen of afkoelen vast wordt; hierop berust het lijmen, soldéren en zamenlutéren. Wanneer voorwerpen door middel van lijm, kalk, gips of dergelijke met elkander verbonden worden, zal de adhaesie van dit verbindingsmiddel aan de verbondene ligchamen somtijds sterker wezen, dan de cohaesie dier ligchamen zelven. Ook het verwen berust op de adhaesie van vaste ligchamen. Bij het vergulden of verzilveren is het ook alleen de adhaesie, die het dunne laagje goud of zilver op het andere metaal doet blijven.

20. **Kristallen.** — In de wijze waarop de atomen naast elkander geplaatst zijn, als zij vaste ligchamen vormen, neemt men somtijds zekere regelmatigheid waar. Bij de anorganische of niet bewerktuigde ligchamen bestaat die regelmatigheid daarin, dat de deeltjes, wanneer zij aan zich zelven overgelaten worden, zich tot eenen bepaalden vorm vereenigen. Dien regelmatigen vorm neemt men waar bij eene menigte stoffen in den toestand, waarin de natuur ze ons aanbiedt; vooral echter kan men dien waarnemen bij die ligchamen, die van den vloeibaren toestand tot den vasten zijn overgegaan. Dit streven der deeltjes om zoodanige regelmatige gedaante voort te brengen noemt men kristallisatie of kristalvorming, terwijl men door kristallen die regelmatige, door platte vlakken begrensde ligchamen verstaat.

Hoewel de anorganische ligchamen ook in eenen vormloozen toestand kunnen voorkomen (men noemt ze dan *amorph*), hebben echter de meeste eenen

bepaalden kristalvorm, welke voor eene zelfde stof steeds dezelfde is, en daarom een belangrijk herkenningsmiddel der delfstoffen uitmaakt. Ook door kunst, namelijk door ze te smelten of op te lossen, en daarna weder tot den vasten toestand te doen overgaan, kan men de meeste stoffen den kristalvorm doen verkrijgen. Zwavel bijv. is, zoo als die in den handel voorkomt, amorph; smelt men die in eene schaal of kroes, en verkoelt ze langzaam, tot de bovenste oppervlakte hard wordt, en maakt dan in die korst eene opening, waardoor men de nog vloeibare zwavel laat uitloopen, dan zal men, zoo men de overgeblevene vaste stof doorbreekt, aan den binnenkant schoone kristallen van zwavel bespeuren. Van sommige metalen, zoo als bismuth, kan men op eene gelijke wijze kristallen verkrijgen.

De fraaiste kristallen worden verkregen, wanneer de stoffen in het water of eene andere vloeistof oplosbaar zijn. Hoewel van het woord oplossen in het dagelijksch leven een veelvuldig gebruik wordt gemaakt, zoo zullen eenige ophelderingen toch niet overtollig wezen. Wanneer een vast ligchaam en eene vloeistof met elkander in aanraking gebragt worden, dan kan de vermenging zoo innig zijn, dat men van de vaste stof niets meer bemerkt, dan dat zij, zoo zij gekleurd was, aan de vloeistof hare kleur heeft medegedeeld. Legt men bijv. broodsuiker of zout in water, en roert men het om, dan zal weldra het vaste ligchaam schijnbaar geheel verdwenen zijn, en er is niets dan eene heldere vloeistof te bemerken; neemt men blaauw kopervitriool, dan heeft hetzelfde plaats, doch de vloeistof heeft eene blaauwe kleur. In beide gevallen is het vaste ligchaam in de vloeistof opgelost. Noch de vaste stof, noch de vloeistof hebben hierbij eene verandering in zamenstelling ondergaan; men mag het er voor houden, dat de atomen van het vaste ligchaam regelmatig tusschen die der vloeistof verdeeld zijn. Niet alle ligchamen zijn even oplosbaar; de oplosbaarheid neemt bij de meeste toe met de warmte van de vloeistof; keukenzout maakt echter hierop eene uitzondering. Is zooveel mogelijk van de vaste stof opgelost, dan noemt men de oplossing *verzadigd*. Wordt eene verzadigde oplossing verwarmd, of eenvoudig aan zich zelve overgelaten, dan zal de vloeistof verdampen, en er zetten zich kristallen neêr, die doorgaans des te fraaijer zullen zijn, naarmate de verdamping langzamer plaats heeft. Hoe zij zich in de vloeistoffen vormen, heeft men tot nog toe niet kunnen nagaan. Alleen blijkt het uit de mikroskopische onderzoekingen van Ehrenberg, dat plotseling in de heldere vloeistof een vast punt ontstaat, dat zeer schielijk aangroeit, doch zonder dat men in de vloeistof rondom het kristal de minste beweging of strooming kan waarnemen.

Alle kristalvormen kunnen tot zes eenvoudige vormen teruggebragt worden, die men daarom *kristalstelsels* noemt. In die vormen kan men altijd zich eenige

lijnen voorstellen, ten opzigte van welke de vlakken twee aan twee gelijk geplaatst zijn, en welke elkander in één punt binnen in het kristal snijden, dat men daarom *middenpunt* noemt. Die denkbeeldige lijnen noemt men de *assen*, en het is dus van hun betrekkelijken stand, dat de vorm van het kristal afhangt. De indeeling in stelsels berust op de rigting en grootte dier assen.

Fig. 5.

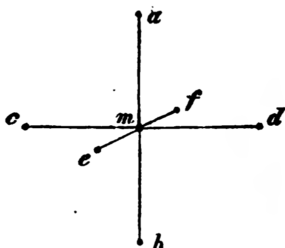


Fig. 6.

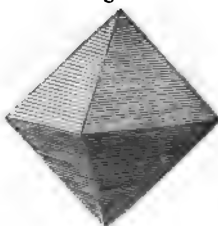
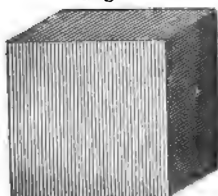


Fig. 7.



In het 1ste stelsel komen drie gelijke assen voor, die loodregt op elkander staan, zoo als in fig. 5 is aangeduid, waarin *e f* verkort is voorgesteld. Men noemt dit het *regelmatige* stelsel. Denkt men zich de uiteinden door platte vlakken vereenigd, dan ontstaat het regelmatige achtvlak of *octaeder* (fig. 6), welke de grondvorm van het regelmatige stelsel uitmaakt, en waaruit alle andere tot dit stelsel behoorende kunnen afgeleid worden, onder anderen de *kubus* of het regelmatige zesvlak (fig. 7). De kristallen van aluin zijn octaeders, die van keukenzout vormen een kubus.

Fig. 8.

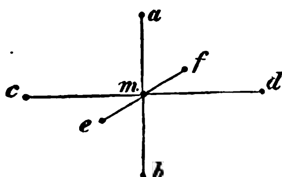


Fig. 9.

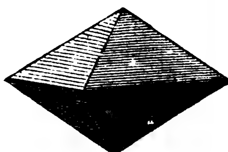


Fig. 10.

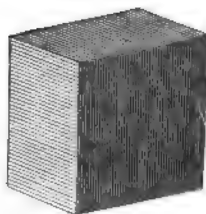
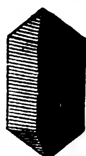


Fig. 11.



Het 2de stelsel heeft eveneens drie op elkander loodregte assen, doch slechts twee van deze zijn even groot. De derde ongelijke as heet *hoofdas*. Fig. 8 stelt de assen voor, waarvan *e f* en *c d* even groot zijn, doch *a b* kleiner; deze laatste kan echter ook grooter zijn dan *c d*. De grondvorm is weder een *octaeder* (fig. 9), die echter niet regelmatig is, en *quadraat-octaeder* genoemd wordt. Het stelsel zelf draagt den naam van het *twee- en een-*

assige of *quadratische* stelsel. Tot dit stelsel behoort ook de quadratische zuil (fig. 10), en eene combinatie van deze met den quadraat-octaeder (fig. 11).

Fig. 12.

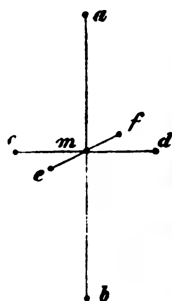


Fig. 13.

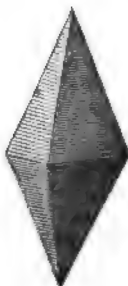
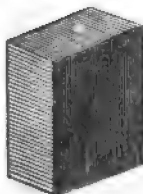


Fig. 14.



Het 3de stelsel heeft ook drie loodregt op elkander staande assen, maar zij zijn allen van verschillende grootte (fig. 12). Hier vormt de onregelmatige of *rhombische octaeder* (fig. 13) den grondvorm, en de regte rhombische zuil een afgeleiden vorm (fig. 14). Dit stelsel heeft den naam van *rhombische* of *een- en eenassige stelsel.*

Fig. 15.

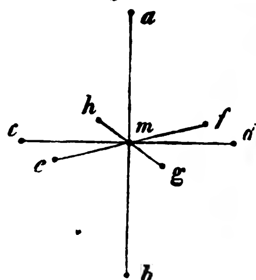


Fig. 16.

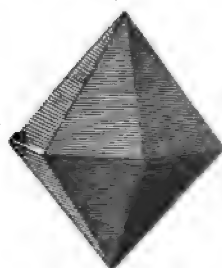
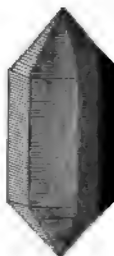


Fig. 17.



Het 4de stelsel heeft vier assen, waarvan drie even groote in een zelfde vlak liggen en onderling gelijke hoeken maken, terwijl de vierde loodregt op dat vlak staat, en eene verschillende grootte heeft. Deze laatste is de hoofdas. Fig. 15 stelt de assen voor, en fig. 16 de dubbele zeshoekige piramide, welke den grondvorm van dit stelsel uitmaakt, dat den naam draagt van *hexagonale* of *drie- en een-assige* stelsel. Een der belangrijkste in dit stelsel voorkomende vormen is die van fig. 17, de gewone kristalvorm van het kwarts.

Fig. 18.

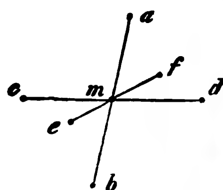
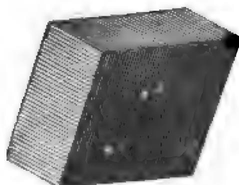


Fig. 19.



Het 5de stelsel heeft drie assen, waarvan twee *a b* en *c d* (fig. 18) een scherpen hoek met elkander maken, terwijl de derde *e f* loodregt staat op het vlak, door de twee eerste bepaald. Men noemt dit het *twee- en eenledige* of *monoklinische* stelsel. Een

der hoofdvormen hierin is de schuine rhombische zuil (fig. 19). In dit stelsel behooren de kristallen van suiker, ijzervitriool, enz.

Eindelijk heeft men nog het *een- en een-ledige* of *triklinische* stelsel, dat drie assen heeft, alle van ongelijke grootte en geene regte hoeken met elkander makende. In dit stelsel, waarin onder anderen de kristallen van kopervitriool behooren, komen de minst regelmatige en symmetrische kristallen voor.

Eene opmerkelijke eigenschap der kristallen is hunne *spleetbaarheid*, dat is, dat zij, wanneer men ze in stukken slaat, volgens bepaalde vlakken breken, die altijd aan de kristalvlakken evenwijdig zijn. Bij sommige eenvoudige kristalvormen is dit zeer duidelijk zigtbaar; slaat men bijv. een stuk zout, zoo als het in de natuur in den vorm van schoone kuben voorkomt, met een hamer, dan zullen nagenoeg alle stukken weder kuben zijn. Even gemakkelijk is dit waar te nemen bij de kalkspath, die in den vorm eener rhombische zuil (fig. 19) voorkomt.

Zoo even is de opmerking gemaakt, dat iedere kristalliseerbare stof een bepaalden kristalvorm bezit. Doorgaans mag men dit als regel aannemen. Enkele stoffen zijn er echter, die in verschillende kristalvormen kunnen voorkomen; dit is onder anderen het geval bij de zwavel. In die gevallen hangt de kristalvorm alleen van de omstandigheden af, onder welke de kristallen ontstaan. Ligchamen, welke deze eigenschap hebben, noemt men *dimorph*.

B. SCHEIKUNDIGE VERSCHEIDENHEID.

21. **Scheikundige verbinding, grondstoffen.** — Er zijn in de natuur een groot aantal ligchamen, die wel den naam van homogeen verdienen, daar zelfs hunne kleinste deeltjes alle van dezelfde soort zijn en gelijke eigenschappen hebben, maar die toch uit verschillende bestanddeelen zamengesteld zijn. Elk deeltje bijv. van een kristal van keukenzout heeft geheel dezelfde eigenschappen, en toch zal het kunnen worden ontleed in twee bestanddeelen, waarvan het eene een metaal is, natrium genoemd, terwijl het andere eene gasvormige stof, de chloor is; deze beide bestanddeelen verschillen in eigenschappen van het ligchaam, waaruit zij verkregen zijn.

Zoodanig zamengesteld ligchaam noemt men eene scheikundige verbinding, die wel behoort onderscheiden te worden van hetgeen men gewoonlijk een mengsel noemt. Wanneer men bijv. zwavel en kopervijlsel door elkander mengt en goed fijn wrijft, zal men een mengsel verkrijgen, waarin men met behulp van den mikroskoop altijd nog de deeltjes zwavel en koper afgescheiden zal kunnen waarnemen; wordt dit mengsel echter verhit, dan begint het te gloeijen, de zwavel *verbindt zich* met het koper, en er wordt een nieuw lig-

chaam, het zwavelkoper, gevormd, dat geheel andere eigenschappen heeft dan zwavel of koper elk afzonderlijk, en dat op zijne beurt weder kan ontleed worden in die twee bestanddeelen. De meeste voorwerpen om ons zijn zulke scheikundige verbindingen. Sommige kunnen ontleed worden in andere, die zelven weder zamengesteld zijn, en in hunne bestanddeelen kunnen gescheiden worden. Salpeter bijv. bestaat uit kali en salpeterzuur; kali kan gescheiden worden in zuurstof en een metaal, kalium genaamd, terwijl salpeterzuur uit stikstof en zuurstof bestaat. Enkele ligchamen daarentegen kunnen wij niet in nadere bestanddeelen ontleden; daarom noemen wij die grondstoffen of elementen. Of de grondstoffen inderdaad uit enkelvoudige atomen zamengesteld zijn, kunnen wij niet beslissen; wij kennen ze dien naam toe, omdat het tot nog toe niet is mogen gelukken, ze in andere te ontleden. Men telt tegenwoordig 62 grondstoffen, waaronder echter vele slechts zeldzaam voorkomen en van minder belang zijn. De voornaamste zijn in de tabel op bladz. 30 opgenoemd.

22. **Verwantschap.** — De kracht, welke de atomen van het eene ligchaam met die van een ander tracht te verbinden, en dus eene aantrekkingskracht is tusschen ongelijksoortige atomen, noemt men scheikundige verwantschap of affiniteit; van die twee stoffen zegt men, dat zij verwantschap tot elkander hebben (1).

Niet bij alle ligchamen bestaat die verwantschap; sommige kunnen, onder welke omstandigheden ook, tot elkander gebragt, geene verbinding onderling aangaan. Doch ook stoffen, tusschen welke verwantschap bestaat, zullen slechts onder bepaalde omstandigheden zich met elkander verbinden; het voorbeeld van het koper en de zwavel, die warmte noodig hadden om zwavelkoper te vormen, is er een bewijs van. Daar de scheikundige aantrekking van ongelijksoortige atomen eene kracht is, die slechts werkt, wanneer de deeltjes in onmiddelijke aanraking met elkander zijn, zoo wordt in het algemeen de verbinding zeer bevorderd, wanneer de cohaesie verminderd wordt, dus door fijne verdeeling dier stoffen, of door ze alvorens in den vloeibaren staat te brengen; ook door warmte, daar deze, zoo als boven reeds is opgemerkt, eveneens de cohaesie aanzienlijk vermindert. Door licht of electriciteit kunnen ook mengsels in verbindingen overgaan. Een mengsel van waterstofgas en chloorgas aan het licht blootgesteld, verandert met eene ontploffing in eene scheikundige verbinding, die men chloorwaterstofzuur noemt.

---

(1) De benaming: *verwantschap* is eigenlijk weinig geschikt, om van de zaak een helder denkbeeld te geven; want juist die ligchamen, welke het naast aan elkander *verwant* zijn, tusschen welke de meeste overeenkomst bestaat, zijn doorgaans het minst geschikt om zich onderling te verbinden.

Zuurstof en waterstof worden door eene electrische vonk tot water verbonden. Vooral echter zullen vele stoffen verbindingen kunnen aangaan, wanneer zij met elkander in aanraking gebragt worden, op het oogenblik dat zij uit andere verbindingen vrij worden, of zoo als men het noemt, *in statu nascenti* verkeeren.

De verwantschap bestaat niet alleen tusschen grondstoffen; ook zamengestelde ligchamen kunnen verbindingen met elkander aangaan. Een zelfde ligchaam, hetzij enkelvoudig of zamengesteld, kan bovendien tot verschillende ligchamen een verschillenden graad van verwantschap bezitten. Wordt een zamengesteld ligchaam in onmiddellijke aanraking gebragt met een ander, tot hetwelk een zijner bestanddeelen eene grootere affiniteit heeft, dan die der bestanddeelen onderling, dan verlaat dit de eerste verbinding, om met het derde ligchaam eene nieuwe verbinding aan te gaan. Men noemt dit *keurverwantschap.* Een paar voorbeelden zullen dit nader ophelderen. Marmer is eene verbinding van kalk en koolzuur; schenkt men er zwavelzuur op, dan verbindt zich de kalk terstond met het zwavelzuur, en laat, om zoo te zeggen, het koolzuur los, dat, een gas zijnde, ontwijkt. De scheikundige aantrekking tusschen kalk en zwavelzuur is dus grooter, dan die tusschen kalk en koolzuur. Het vermiljoen, zoo als het in de natuur voorkomt, is eene verbinding van kwikzilver met zwavel; gloeit men dit, na het met fijn verdeeld ijzer vermengd te hebben, dan verbindt zich de zwavel met het ijzer, en men verkrijgt het kwikzilver vrij. Bij twee zamengestelde verbindingen kunnen de bestanddeelen wederkeerig elkanders plaats innemen. Wanneer salpeterzure baryt en zwavelzure soda in water opgelost en daarna bij elkander gevoegd worden, dan zal het zwavelzuur van laatstgenoemd ligchaam zich verbinden met de baryt van het eerste, waartoe het meerdere affiniteit heeft, terwijl het salpeterzuur van het eerste zich met de soda van het tweede verbindt. De aldus gevormde zwavelzure baryt valt als een onoplosbaar wit poeder neder, terwijl de salpeterzure soda opgelost blijft, en uit de vloeistof door verdamping in den kristalvorm kan verkregen worden.

23. **Zuren, basen, zouten, indifferente stoffen.** — Even als bij de grondstoffen, zoo is ook bij zamengestelde ligchamen de neiging om onderling verbindingen aan te gaan zeer verschillend. Men heeft dit onderscheid in verwantschap zelfs tot grondslag genomen, om de zamengestelde ligchamen in drie voorname hoofdafdeelingen te verdeelen, namelijk *zuren*, *basen* en *indifferente verbindingen.*

De kenschetsende eigenschappen van zuren bestaan daarin, dat de meeste in water oplosbaar zijn, dat hunne oplossingen blaauwe plantenkleuren, zoo als lakmoes, rood kleuren, en dat zij in water opgelost een zuren smaak hebben, van waar zij ook hunnen naam verkregen hebben. De basen daarentegen,

welke in water kunnen opgelost worden, geven aan het roodgeworden lakmoes zijne blaauwe kleur terug, en kleuren geele plantenkleuren, zoo als kurkuma, bruin. Violenstroop wordt door een zuur schoon rood, door eene basis groen gekleurd. De smaak eener basis is meestal bijtend scherp. Hare voorname eigenschap bestaat echter daarin, dat zij met zuren verbindingen aangaan en zouten vormen. Zoo is bijv. zwavelzuur, eene verbinding van zwavel met zuurstof, een zuur; potassa, eene verbinding van potassium met zuurstof, eene basis; deze vormen onderling een zout, dat, zoo als de meeste, in kristalvorm kan verkregen worden. Dit zout, dat zwavelzure potassa genoemd wordt, zal een door lakmoes blaauw gekleurd papier niet veranderen, en heet daarom een neutraal zout. Sommige zouten echter kleuren blaauw lakmoespapier rood; het zuur heeft daarin dus nog de overhand, en daarom noemt men de zoodanige zure zouten. Heeft daarentegen de basis de overhand, zoodat rood lakmoespapier door de oplossing blaauw gekleurd wordt, dan noemt men het een basisch zout(1).

Even als overal in de natuur kan men geene scherpe afscheiding maken tusschen basen en zuren. Sommige zwakke zuren vervullen daarom tegenover sterkere soms de rol van basis, terwijl zwakke basen tegenover sterkere zich als zuren voordoen. Indifferente stoffen noemt men die, welke eigenlijk noch basis noch zuur zijn, hoewel zij tegenover sterke zuren of basen somtijds wel basische of zure eigenschappen kunnen aannemen. Onder deze wordt veelal het water gerekend.

24. **Metalen, metalloïden.** — De grondstoffen worden onderscheiden in twee afdeelingen, metalen en niet-metalen of metalloïden genoemd. Hoewel het ook hier wederom moeijelijk is eene scherpe grens te trekken, zoo kan men toch als voorname physische eigenschappen der metalen noemen, dat zij de warmte en electriciteit geleiden, zoo als wij later bij de behandeling dier hoofdstukken nader zullen zien, terwijl de meeste metalloïden die eigenschappen missen. De metalen hebben eenen eigenaardigen glans, daarom metaalglans genoemd; zij zijn ondoorzigtig en smeltbaar, hoewel deze laatste eigenschap bij verschillende metalen zeer onderscheiden is; sommige smelten reeds bij zeer geringe warmte, terwijl bij andere een zeer hooge warmtegraad daartoe noodig is. Hun soortelijk gewigt is zeer verschillend; sommige, zoo als kalium en natrium, zijn ligter dan water, de meeste echter veel zwaarder, zoo als platina, goud, lood, zilver, enz. De voornaamste scheikundige eigenschap, waardoor de metalen van de metalloïden onderscheiden zijn, is, dat eerstgenoemde

---

(1) De gegevene bepaling is wetenschappelijk niet volkomen juist; wij bepalen ons echter daarbij, omdat wij hier niet in meerdere bijzonderheden kunnen treden.

allen verbindingen met zuurstof kunnen aangaan, waarvan de meeste als basis van een zout kunnen dienen.

Van de metalloïden is het moeijelijker algemeene eigenschappen op te geven; sommige zijn gasvormig, andere vloeibaar, weder andere vast. Hunne verbindingen met zuurstof zijn geene basen; daarentegen zijn de sterkste zuren verbindingen van metalloïden onderling. De metalen kunnen met sommige metalloïden verbindingen aangaan, welke alle eigenschappen van zouten hebben; het gewone keukenzout of chloornatrium, eene verbinding van het metaal natrium met een gasvormig metalloïde, chloor genaamd, is een voorbeeld daarvan.

Van de in de tabel (bladz. 30) opgenoemde grondstoffen zijn de negen eerste metalloïden; de overigen zijn metalen. In het geheel telt men er van de eerste 13, en 49 metalen. De niet-metalen worden dikwijls nog gesplitst in twee afdeelingen, de *oxygenoïden*, die door hunne eigenschappen als tegenhangers der metalen beschouwd kunnen worden, en de eigenlijke metalloïden, naar metalen gelijkende. Tot de oxygenoïden behooren van de negen in de tabel opgenoemde de zuurstof, zwavel, chloor en jodium; tot de andere de waterstof, stikstof, phosphorus, kiezel en koolstof.

25. **Aequivalenten.** — Wij hebben reeds opmerkzaam gemaakt op het onderscheid tusschen een mengsel en eene scheikundige verbinding; nog in een ander opzigt is dit onderscheid zeer in het oog loopend. Maakt men een mengsel van kwikzilver en zwavel, door deze zamen te wrijven, dan is het onverschillig, welke de verhouding is, waarin die beide stoffen vermengd worden. Bij eene scheikundige verbinding is zulks echter niet het geval. De nieuwe stof, het zwavel-kwikzilver (vermiljoen), bevat altijd op 16 gewigtsdeelen zwavel 100 deelen kwikzilver. Neemt men van een van beide stoffen meer, dan door deze verhouding wordt aangewezen, dan zal, na het smelten, nog eene hoeveelheid zwavel of kwikzilver onveranderd en onverbonden overblijven. Dit is niet alleen het geval met zwavel-kwikzilver, maar met alle scheikundige verbindingen. De grondstoffen verbinden zich altijd in bepaalde verhoudingen met elkander; zoo zullen bijv. 16 gewigtsdeelen zwavel zich verbinden met 24 deelen zuurstof tot zwavelzuur, 8 deelen zuurstof met 1 deel waterstof tot water, 1 deel waterstof met 35.5 deelen chloor tot chloorwaterstofzuur, enz. Die getallen nu, welke aanduiden hoeveel gewigtsdeelen van elke van twee of meer stoffen er noodig zijn, om eene scheikundige verbinding te verkrijgen, noemt men aequivalentgetallen, of ook wel eenvoudig aequivalenten. Men stelt tegenwoordig meestal het aequivalent-getal van waterstof = 1; die der andere grondstoffen duiden dan aan, hoeveel gewigtsdeelen daarvan noodig zijn, om zich met een deel waterstof te verbinden, en

ook om onderling verbindingen te kunnen aangaan, wel te verstaan, indien er tusschen die grondstoffen verbindingen mogelijk zijn. Zegt men bijv. dat het aequivalent-getal van kwikzilver 100 en dat van zuurstof 8 is, dan wil dat zeggen, dat 8 deelen zuurstof zich met 100 deelen kwikzilver verbinden. Vroeger nam men meestal voor het aequivalent van zuurstof, dat volgens deze aanname 8 bedraagt, het getal 100 aan; alle getallen worden dan in dezelfde verhouding, dat is 12,5 maal, grooter.

In de volgende tabel zijn de voornaamste en meest voorkomende grondstoffen vermeld met hunne aequivalent-getallen, als ook met het teeken, waar door men ze gewoonlijk in de scheikunde aanduidt, en dat meestal de eerste letter van de latijnsche benaming der stof is.

Namen van eenige. grondstoffen.	Teeken.	Aequivalent, dat voor waterstof = 1 stellende.	Namen van eenige grondstoffen.	Teeken.	Aequivalent, dat voor waterstof = 1 stellende.
Zuurstof (Oxygenium) . .	O	8.0	IJzer (Ferrum)	Fe	28.0
Waterstof (Hydrogenium) .	H	1.0	Kobalt (Cobaltum) . . .	Co	29.5
Stikstof (Nitrogenium) . .	N	14.0	Nikkel.	Ni	29.6
Zwavel (Sulphur). . . .	S	16.0	Zink	Zn	32.5
Chloor.	Cl	35.5	Cadmium.	Cd	55.7
Jodium	J	126.3	Tin (Stannum).	Sn	58.8
Phosphorus	P	32.0	Lood (Plumbum)	Pb	103.6
Kiezel (Silicium). . . .	Si	21.3	Bismuth	Bi	212.8
Koolstof (Carbonium) . .	C	6.0	Arsenicum	As	75.0
			Antimonium (Stibium) . .	Sb	129.0
Potassium (Kalium) . . .	K	39.2	Koper (Cuprum)	Cu	31.7
Sodium (Natrium). . . .	Na	23.0	Kwikzilver (Hydrargyrum).	Hg	100.0
Calcium	Ca	20.0	Zilver (Argentum) . . .	Ag	108.0
Magnesium	Mg	12.0	Goud (Aurum).	Au	196.4
Aluminium	Al	13.7	Platinum	Pt	98.6
Manganesium	Mn	27.6			

Onder deze stoffen zijn er echter vele, die zich niet alleen in de hier opgegevene verhoudingen verbinden, maar ook in twee, drie, of meer andere verhoudingen. Tusschen deze en de hier opgegevene bestaat alsdan echter een naauw verband, daar de verschillende hoeveelheden van de ééne stof, die

zich met eene zelfde hoeveelheid der andere stof kunnen verbinden, wederom tot elkander in eene zeer eenvoudige verhouding staan, welke kan uitgedrukt worden door de getallen 1, $1^1/_2$, 2, $2^1/_2$, 3, 4, 5, enz. Een voorbeeld zal voldoende zijn, om deze scheikundige wet duidelijker te maken. Volgens de tabel verbinden zich 14 deelen stikstof met 8 deelen zuurstof; men noemt deze verbinding *stikstofoxydule*, en duidt ze, van de opgegevene teekens gebruik makende, aan door NO. Die 14 deelen stikstof kunnen zich ook verbinden met eene tweemaal grootere hoeveelheid zuurstof, dus 16 deelen, en vormen dan *stikstofoxyde*, dat men, omdat er nu eene dubbele hoeveelheid, of *twee aequivalenten* zuurstof met *één aequivalent* stikstof verbonden zijn, aanduidt door NO_2. Zijn 14 deelen stikstof verbonden met 3 × 8 of 24 deelen zuurstof dan ontstaat er *salpeterigzuur*, NO_3; 14 deelen stikstof geven met 4 × 8 of 32 deelen zuurstof *ondersalpeterzuur*, NO_4, en eindelijk met 5 × 8 of 40 deelen zuurstof *salpeterzuur*, NO_5. Op dergelijke wijze verbinden zich 28 deelen ijzer met 8 deelen zuurstof tot *ijzeroxydule*, dat, van elk der beide stoffen één aequivalent bevattende, moet worden aangeduid door Fe O. Er bestaat echter nog eene andere verbinding van deze twee grondstoffen, waarin twee aequivalenten of 56 deelen ijzer zich verbinden met drie aequivalenten of 24 deelen zuurstof; deze wordt dus aangewezen door de formule $Fe_2\,O_3$.

Wij hebben hier gebruik gemaakt van de zoogenaamde scheikundige formulen; deze zijn slechts een eenvoudig middel om de stoffen aan te duiden, en tevens te doen zien, hoe zij zijn zamengesteld. Te dien einde plaatst men de letters of teekens, waardoor de grondstoffen worden aangeduid, naast elkander; zijn in eene verbinding meer dan één aequivalent van eene grondstof aanwezig, dan geeft men dit te kennen, door een cijfer achter beneden de letter te plaatsen.

Zoo als wij hebben opgemerkt, zijn het niet alleen de grondstoffen die zich onderling kunnen verbinden, maar kunnen ook zamengestelde ligchamen weder onderling scheikundige verbindingen aangaan. Ook bij die verbindingen heeft dezelfde eenvoudige wet plaats, dat die zamengestelde stoffen zich slechts in bepaalde verhoudingen onderling kunnen verbinden, wederom door hunne aequivalent-getallen aangewezen. De aequivalent-getallen dier zamengestelde ligchamen zijn eenvoudig de sommen der aequivalent-getallen der grondstoffen, waaruit zij zijn zamengesteld. Zoo is bijv. het aequivalent-getal van water (HO) 9, van stikstofoxydule (NO) 22, van salpeterzuur (NO_5) 54, van potassa (KO) 47.2, van ijzeroxyde ($Fe_2\,O_3$) 80, enz. Wil men salpeterzuur verbinden met potassa tot salpeter, dan is het aequivalent-getal dier stof, aangeduid door het teeken KO, NO_5, 47.2 + 54 = 101.2. Voor de formulen van zouten, zooals dit laatste, plaatst men eerst het teeken van de basis, en daarna dat van het zuur, terwijl men ze door eene komma van elkander scheidt.

De leer der scheikundige aequivalenten staat in een naauw verband met de hypothese, welke wij vroeger hebben medegedeeld omtrent den inwendigen bouw der ligchamen. Wanneer men namelijk aanneemt, wanneer een aeq. of 16 deelen zwavel zich verbindt met een aeq. of 100 deelen kwikzilver, tot één aeq. of 116 deelen vermiljoen of zwavelkwikzilver, dat in elke der bijeengebragte hoeveelheden een gelijk aantal atomen aanwezig zijn, dan zal elk atoom zwavel zich met een atoom kwikzilver verbonden hebben tot één zamengesteld atoom vermiljoen. De aequivalentgetallen duiden dan tevens de verhouding aan van het gewigt der atomen, en men zoude ze dus ook *atoomgewigten* kunnen noemen.

Bij de gassoorten geeft men ook acht op het volume van de hoeveelheden, die zich met elkander verbinden, en komt dan somtijds tot resultaten, die schijnbaar afwijken van die, waartoe de leer der aequivalenten leidt. Water bijv. bestaat uit 1 aeq. zuurstof en 1 aeq. waterstof; wordt het echter scheikundig ontleed (wij zullen later zien, hoe zulks geschieden kan), dan bevindt men, dat het bestaat uit 1 volume zuurstof en 2 volumen waterstof. Men moet dus wel aannemen, dat in een aeq. waterstof tweemaal meer atomen bevat zijn dan in een aeq. zuurstof, wanneer men ten minste van de onderstelling uitgaat, dat in gelijke volumen of maten der verschillende gassoorten een gelijk aantal atomen bevat is. Het atoomgewigt van waterstofgas moet dus de helft wegen van zijn aequivalentgetal, dus 0.5. Hetzelfde geldt van stikstof, chloor en eenige anderen.

Tot hetzelfde resultaat kunnen wij ook nog langs een anderen weg geraken. Men kan namelijk uit de aequivalenten van twee ligchamen en hunne digtheid, de volumen berekenen, waarin zij zich onderling verbinden. Het volume van een ligchaam wordt gevonden, door het absolute gewigt door het soortelijk gewigt te deelen (13). De digtheid van de dampkringslucht = 1 stellende, is die van zuurstof 1.103, van stikstof 0.976, van waterstof 0.068, van chloor 2.470. Men vindt dus voor

$$\text{Zuurstof} \quad \frac{8}{1.103} = 7.25,$$

$$\text{Stikstof} \quad \frac{14}{0.976} = 14.35,$$

$$\text{Waterstof} \quad \frac{1}{0.068} = 14.70,$$

$$\text{Chloor} \quad \frac{35.5}{2.470} = 14.33.$$

Uit deze getallen, welke men gewoonlijk *aequivalent-volume* noemt, blijkt, dat de berekende volumen van stikstof, waterstof en chloor gelijk mogen gesteld worden, maar het dubbel van dat van zuurstof bedragen. Één volume zuurstof zal

zich dan ook, zoo als wij boven opgemerkt hebben, met twee volumen van een der drie andere gassoorten verbinden.

26. **Scheikundige benaming.** — Wij hebben reeds enkele malen, bij de aanduiding van zamengestelde stoffen, gebruik gemaakt van namen, omtrent welker beteekenis nog eenige ophelderingen noodig zijn. Terwijl men in vroegere tijden de stoffen meestal aanduidde, hetzij naar hare uitwendige eigenschappen, hetzij naar hare geneeskundige hoedanigheden, of ook we ze noemde naar personen, die ze of ontdekt hadden of hadden leeren gebruiken, heeft men sedert Lavoisier (1778), en vooral sedert Berzelius (1815) in de scheikunde een vast stelsel ingevoerd, waaraan het voordeel verbonden is, dat de naam eener stof tevens aanduidt, uit welke bestanddeelen zij is zamengesteld. Men plaatst namelijk meestal de namen der grondstoffen, waaruit zoodanig ligchaam is zamengesteld, naast elkander, zoodat bijv. zwavelkoper eene verbinding aanduidt van zwavel met koper (CuS), chloorsodiüm ($NaCl$) eene verbinding van chloor met sodium, enz. Zijn er in de verbinding meer aequivalenten van de eene stof aanwezig, dan wordt dit aangewezen, door er een der woordjes half, dubbel, drievoudig, enz. voor te zetten. Zoo spreekt men bijv. van half-chloorkwikzilver (Hg_2Cl), van drievoudig-zwavelkalium (KaS_3), enz.

Bij verbindingen, waarin zuurstof een der bestanddeelen uitmaakt, wijkt men echter van deze methode eenigzins af, voornamelijk omdat de aard der verbindingen van zuurstof met andere grondstoffen geheel verschillend zijn kan, naar gelang zij daarmede zuren, basen of indifferente verbindingen vormt. De beide laatste soorten van zuurstofverbindingen noemt men *oxyden*. De meeste grondstoffen vormen echter met zuurstof meer dan éène verbinding van basischen of indifferenten aard; om deze aan te duiden is eene wijziging van den naam noodig. IJzer bijv. vormt met zuurstof twee basen; die, welke de meeste zuurstof bevat, noemt men daarom ijzeroxyd (Fe_2O_3), de andere ijzeroxydul (FeO). Zijn de zuurstofverbindingen indifferent, en bevatten zij minder zuurstof dan de basis, dan noemt men ze *suboxyd*, bijv. loodsuboxyd (Pb_2O); bevatten zij meer zuurstof, dan heeten zij *hyperoxyd* of *peroxyd*, zooals mangaan-hyperoxyd (bruinsteen) (MnO_2).

Ook om de zuren van elkander te onderscheiden, die gevormd worden door de verbinding eener grondstof met verschillende hoeveelheden zuurstof, is eene wijziging van den naam noodig. In het algemeen duidt men de hoogste zuurstof-verbinding van zuren aard aan door achter den naam van de stof het woord *zuur* te plaatsen, bijv. zwavelzuur (SO_3), phosphorzuur (PO_5), enz. Die, welke minder zuurstof bevatten, noemt men zwaveligzuur (SO_2),

phosphorigzuur (PO_3), enz. Men gebruikt ook wel uitdrukkingen, zoo als onderzwaveligzuur (S_2O_2), onderzwavelzuur (S_2O_5), overchloorzuur (ClO_7) en dergelijke, om lagere of hoogere zuurstofverbindingen aan te duiden; doch deze zijn dan gewoonlijk verbindingen, die eerst later zijn ontdekt geworden, en dus, zoo men daarop den algemeenen regel had willen toepassen, eene verandering in de namen der vroeger ontdekte hadden moeten ten gevolge hebben, waardoor verwarring zoude ontstaan zijn.

De zuren, waarvan hier sprake was, zijn alle zuurstofverbindingen; men noemt ze daarom ook wel *zuurstofzuren*. Er zijn echter nog andere verbindingen der metalloïden onderling, voornamelijk met waterstof, die evenzeer sterke zuren vormen, en die men daarom *waterstofzuren* noemt, hoewel, zoo als later blijken zal, de waterstof daarin niet dezelfde rol speelt, als de zuurstof in de zuurstofzuren. Een voorbeeld van zoodanige verbindingen is het chloorwaterstofzuur ($H\,Cl$) of zoutzuur.

De namen van de zouten worden met behulp van die van de basis en van het zuur, waaruit zij zijn zamengesteld, aangeduid, door den laatsten in een bijvoegelijk naamwoord te veranderen; zoo spreekt men bijv. van salpeterzuur zilveroxyde (AgO, NO_5), zwavelzuur loodoxyde (PbO, SO_3), koolzure potassa (KO, CO_2), enz. Sommige zouten hebben meer dan eene basis, en heeten daarom dubbelzouten, zooals bijv. de gewone aluin, die eigenlijk *zwavelzure aluinaarde-potassa* is.

Verbindingen der metalen onderling noemt men *alliages* of *legeringen;* geel koper bijv. is een alliage van koper en zink. Eene verbinding van kwikzilver met een ander metaal heet men *amalgama*.

27. Beschrijving van eenige grondstoffen en hare voornaamste verbindingen.

A. *Zuurstof.* Van alle elementen is er geen, dat in grootere hoeveelheid op de oppervlakte der aarde voorkomt, dan de zuurstof, doch steeds met andere ligchamen verbonden. In den dampkring alleen komt zij onverbonden voor, daar deze bestaat uit een mengsel van ongeveer $^1/_5$ zuurstofgas en $^4/_5$ stikstofgas. Zuurstof is een kleurloos gas, zonder reuk of smaak. Men kan het gemakkelijk uit sommige zijner verbindingen afscheiden. Kwikzilveroxyde ($Hg\,O$) behoeft slechts verhit te worden, om ontleed te worden in kwikzilver en zuurstof. Bruinsteen of mangaanhyperoxyd ($Mn\,O_2$) verliest bij verhitting een gedeelte van zijne zuurstof, en verandert in een lager oxyde; ook chloorzure potassa ($KO, Cl\,O_5$) verliest bij verhitting alle zuurstof, en verandert in chloorkalium (KCl).

Zuurstof is noodig voor het leven, en onderhoudt de verbranding. Brandende ligchamen branden in zuurstof met veel grooteren glans, dan in de damp-

kringslucht. Verbranding in de lucht is niets anders dan eene vereeniging van de brandbare stof met zuurstof, of, zoo als men het noemt, eene *oxydatie*. Afscheiding van elementen uit hunne zuurstofverbindingen heet men *reductie*.

Het oxydatievermogen van de zuurstof wordt veel sterker door den invloed der electriciteit, of van het licht; vooral is het sterk op het oogenblik, dat zij uit hare verbindingen wordt vrijgemaakt, dat is, in den zoogenaamden *status nascens*. In sommige gevallen heeft zij eenen eigenaardigen reuk, die er den naam *ozon* aan heeft doen geven. Men bereidt ozon het gemakkelijkst, door op den bodem van eene met lucht gevulde flesch een pijpje phosphorus te leggen, dat gedeeltelijk onder water wordt gehouden; plaatst men de flesch op eene warme plaats, en schudt men van tijd tot tijd, dan verkrijgt de lucht in de flesch na korten tijd reeds den eigenaardigen ozonreuk. Door verhitting gaat ozon weder in gewone zuurstof over.

B. *Waterstof* is eveneens een kleurloos gas zonder smaak of reuk, en $14^1/_4$ maal ligter dan zuurstof. Het is niet geschikt om ingeademd te worden. Men kan het op verschillende wijzen bereiden, doch altijd door ontleding van het water (HO), dat uit gelijke aequivalenten zuurstof en waterstof, of uit één volume zuurstof en twee volumen waterstof bestaat. Worden waterdampen door gloeijende met ijzervijlsel gevulde buizen geleid, dan wordt het water ontleed, terwijl de zuurstof zich met het ijzer verbindt en de waterstof vrij wordt. Gemakkelijker verkrijgt men het door zink en verdund zwavelzuur. Het in het zwavelzuur bevatte water wordt ontleed; de zuurstof verbindt zich met zink tot zinkoxyd, dat met zwavelzuur, zwavelzuur zinkoxyd (ZnO, SO_3) vormt, terwijl de waterstof vrij wordt.

Het waterstofgas is zeer brandbaar; in de dampkringslucht brandt het met eene vlam, die zeer weinig licht, maar groote hitte geeft. De verbranding is niet anders, dan eene vereeniging van het waterstofgas met het zuurstofgas der lucht. Man kan zich daarvan overtuigen, door de vlam tegen een koud ligchaam aan te laten komen, waartegen dan het water, dat bij die verbranding gevormd wordt, aanslaat. Brengt men 1 volume zuurstofgas met 2 volumen waterstofgas bij elkander, dan zal dit mengsel, als er een brandend ligchaam bij gebragt wordt, hevig ontploffen en in water overgaan. Men noemt dit mengsel daarom *knalgas*. Ook in andere verhoudingen zal een mengsel van waterstof met zuurstof of dampkringslucht kunnen ontploffen; bij het aansteken van waterstofgas, dat in eene bepaalde ruimte besloten is, is dus steeds de meeste voorzigtigheid aan te wenden.

De hitte van de vlam van het waferstofgas kan veel aanzienlijker gemaakt worden, wanneer men zuurstofgas in dezelve voert. Men gebruikt daartoe kranen, in welke uit twee verschillende gazometers (toestellen, waarin het gas

bewaard wordt) de vereischte hoeveelheden zuurstof en waterstof kunnen aangevoerd worden, en die zoodanig zijn ingerigt, dat men voor geene ontploffingen behoeft bevreesd te zijn. De vlam, die op deze wijze ontstaat, geeft de sterkste hitte, welke men nog door verbranding heeft kunnen verkrijgen. Brengt men er een stukje kalk in, dan wordt dit wit gloeijend, en geeft een verblindend helder licht, dat den naam heeft gekregen van *Drummond's* licht.

Het water, dat bij de verbranding van waterstofgas in zuurstofgas gevormd wordt, is zuiver water, dat wil zeggen, vrij van alle andere bestanddeelen. In de natuur komt het water nergens zuiver voor, daar er altijd meer of min andere stoffen in zijn opgelost. Het regenwater is het minst onzuiver, doch bevat gassoorten, die het uit de lucht heeft opgenomen. Bronwater en alle water, dat uit de aarde te voorschijn komt, houdt verschillende zouten opgelost, die het uit den grond, waardoor het loopt, opneemt. In het zeewater zijn de meeste zouten bevat; vandaar, dat het eene grootere digtheid heeft.

Men kan uit onzuiver water door destillatie zuiver water verkrijgen. Deze bewerking bestaat eenvoudig daarin, dat men het water in een vat door verwarming tot damp brengt, en deze waterdampen in een ander vat door bekoeling weder tot water laat overgaan. De opgeloste zouten blijven in het eerste vat achter.

C. *Stikstof* is ook een kleurloos gas, dat een der bestanddeelen van de dampkringslucht uitmaakt; 100 ruimtedeelen lucht bevatten 21 deelen zuurstofgas en 79 deelen stikstofgas. Men kan dus het stikstofgas het gemakkelijkst daarstellen, door aan de lucht de zuurstof te ontnemen. Laat men bijv. op het water eene kurk drijven, waarop een schaaltje met een stukje phosphorus; steekt men den phosphorus aan, en zet dan eene klok er over heen, zoodat deze even in het water reikt, dan blijft de phosphorus doorbranden, tot dat alle zuurstof onder de klok zich er mede heeft verbonden tot phosphorzuur (PO_5), dat terstond door het water wordt opgenomen. De stikstof blijft dus alleen onder de klok over.

Stikstof is slechts weinig ligter dan zuurstofgas; stelt men het soortelijk gewigt van de dampkringslucht = 1, dan is dat van zuurstof 1.103, van stikstof 0.976. Het is ongeschikt om het leven of de verbranding te onderhouden. Eene aangestokene kaars gaat er terstond in uit. Dieren sterven in zuiver stikstofgas, niet omdat het schadelijk is, maar alleen bij gebrek aan zuurstof.

De dampkringslucht is geene scheikundige verbinding, maar slechts een mengsel van zuurstof en stikstof; de verhouding tusschen de hoeveelheden dezer twee gassoorten is echter overal dezelfde. Behalve deze bevat de dampkring nog eene kleine hoeveelheid koolzuurgas, ook soms nog andere gassen, en eene zeer veranderlijke hoeveelheid waterdamp.

Er zijn vijf verbindingen van stikstof met zuurstof bekend, waarin namelijk 1 aeq. stikstof met 1, 2, 3, 4 of 5 aeq. zuurstof verbonden is. De derde (NO_3) wordt salpeterigzuur, de vijfde (NO_5) salpeterzuur genoemd; den naam van salpeterzuur heeft het van den gewonen salpeter, die eene verbinding van dit zuur met potassa is. Men kan het salpeterzuur dan ook uit den salpeter bereiden, door dien met zwavelzuur te verhitten. De potassa laat het salpeterzuur los, terwijl zij zich met het zwavelzuur, dat een sterker zuur is, verbindt. Het salpeterzuur ontwijkt bij verhitting in dampvormigen toestand, en kan in een ander vat door destillatie in vloeibaren toestand opgevangen worden. Het bevat dan nog water, waarvan het echter niet geheel kan bevrijd worden. Het is eene heldere en kleurlooze vloeistof, die de meeste metalen in metaaloxyden doet overgaan, of zoo als men zegt, ze oxydeert; een gedeelte van de zuurstof verbindt zich dan met het metaal, terwijl de overige zuurstof met de stikstof verbonden blijft, en als stikstofoxyd (NO_2), eene gassoort, ontwijkt. Dit gas heeft echter de eigenschap, van, zoodra het met de zuurstof van de lucht in aanraking komt, die op te nemen en daarmede roode dampen van ondersalpeterzuur (NO_4) te vormen. De metaaloxyden, die aldus door de werking van salpeterzuur ontstaan, verbinden zich meestal met het salpeterzuur, en vormen daarmede salpeterzure zouten. Als men bijv. koper met salpeterzuur behandelt, bemerkt men het koperoxyd niet op zich zelf, daar het zich, zoodra het gevormd wordt, met salpeterzuur tot salpeterzuur koperoxyde (CuO, NO_5) verbindt, hetwelk uit de oplossing in kristalvorm kan verkregen worden. Gewoonlijk zegt men, dat het koper in het salpeterzuur opgelost is; men zal echter ligt inzien, dat deze uitdrukking niet juist is, daar hier eene scheikundige verbinding plaats heeft, en dus geene oplossing, zoo als wij die hiervoren hebben leeren kennen.

Van de andere verbindingen van stikstof met metalloïden moet hier nog de *ammonia* vermeld worden, eene verbinding van 3 aeq. waterstof met 1 aeq. stikstof. Deze beide gassen verbinden zich niet wanneer zij bij elkaar gebragt worden, dan alleen op het oogenblik, dat zij uit andere verbindingen vrij worden, en dus *in statu nascenti* verkeeren. Men kan de ammonia het gemakkelijkst bereiden door een mengsel van salmiak of chloorammonium (H_4NCl) met kalk (CaO) te verhitten; het calcium (Ca) verbindt zich met chloor (Cl) tot chloorcalcium ($CaCl$); een aeq. waterstof vormt met de zuurstof van den kalk water (HO), terwijl ammonia (H_3N) ontwijkt als een gas. Het heeft een sterk prikkelenden reuk, en kan door water in groote hoeveelheid opgenomen worden; bij eene temperatuur van 10° kan water 670 maal zijn volume van dit gas opnemen, dat echter door verwarming er weder uit kan verdreven worden. Eene oplossing van ammonia in water kleurt rood lak-

moespapier blaauw, en heeft alle eigenschappen van eene sterke basis. Het verbindt zich met zuren tot zouten. In den vrijen toestand is ammonia geene basis, doch wordt dit eerst door opname van water, zoodat de formule dan eigenlijk is H_4NO; deze zamenstelling komt dus overeen met die van de metaaloxyden, mits men de verbinding H_4N, welke men *ammonium* noemt, de plaats doe bekleeden, die in de metaaloxyden het metaal inneemt. Men noemt het daarom een *zamengesteld radikaal.*

D. *Zwavel* komt als een vast ligchaam in de natuur zuiver voor, voornamelijk in vulkanische streken, of ook in verbinding met metalen, bijv. met ijzer, als *zwavelkies*, met lood als *loodglans*, met kwikzilver als *vermiljoen*, enz. De zwavel smelt bij 112°; bij meerdere verwarming wordt zij taai en donker van kleur; wordt de temperatuur verhoogd tot 420°, dan kookt zij en wordt gasvormig. De bruingeele zwaveldampen zetten zich tegen koude ligchamen als een geel poeder af, en vormen de zoogenaamde zwavelbloemen.

Met de zuurstof gaat de zwavel verscheidene verbindingen aan, waarvan wij er echter slechts twee zullen vermelden, het zwaveligzuur (SO_2) en het zwavelzuur (SO_3).

Het zwaveligzuur ontstaat bij verbranding van de zwavel, die zich met de zuurstof van den dampkring verbindt. Zijn onaangename reuk, die eene sterk prikkelende werking op de ademhalingswerktuigen uitoefent, is iedereen bekend. Het is een kleurloos gas, dat bij eene temperatuur van — 10° vloeibaar wordt. Om het te bereiden, verhit men in eene glazen kolf zwavelzuur (SO_3) met koper; een gedeelte van het zwavelzuur geeft een aeq. zuurstof aan het koper af, dat dus koperoxyde wordt, en zich met zwavelzuur tot zwavelzuur koperoxyde (CuO, SO_3) verbindt, terwijl zwaveligzuur (SO_2) als een gas ontwijkt. Laat men dit in eene buis komen, die in een koudmakend mengsel geplaatst is, dan verdigt het zich weldra tot eene vloeistof. Als zich eenige vloeistof in de buis verzameld heeft, smelt men ze toe, en kan dan het vloeibare zwaveligzuur daarin bewaren. Zoodra dit echter aan de vrije lucht komt, gaat het weder tot den gasvormigen toestand over, waarbij de ligchamen, waarmede het in aanraking is, zeer sterk afgekoeld worden. Later zullen wij de oorzaak van dit verschijnsel leeren kennen, alsmede het gebruik dat men er van heeft weten te maken.

Zwaveligzuur is een zwak zuur; dit is niet het geval met de andere verbinding van zwavel en zuurstof, die reeds meermalen onder den naam van zwavelzuur (SO_3) vermeld is. Wij zullen van de verschillende wijzen, waarop het kan bereid worden, slechts de volgende vermelden. Door sterke oxydatiemiddelen, bijv. door salpeterzuur, wordt in water opgelost zwaveligzuur hooger geoxydeerd en dus in zwavelzuur veranderd. Het hierdoor ontstane mengsel

van zwavelzuur, salpeterzuur en water wordt in eene glazen retort gedestilleerd, waaruit eerst salpeterzuur en water overgaan, zoodat er eene zure vloeistof overblijft, die eene verbinding is van zwavelzuur met water.

Het zwavelzuur is een der sterkste bekende zuren, zoodat het de meeste andere zuren uit hunne verbindingen verdrijft, althans wanneer er genoegzame warmte wordt aangebragt. Het kan in damp veranderd worden. Wordt sterk zwavelzuur met water vermengd, dan ontstaat er eene aanzienlijke hitte; het is daarom voorzigtiger het zwavelzuur langzamerhand, onder gestadig omroeren, in het water te schenken, dan omgekeerd.

Zwavel verbindt zich met waterstof, doch niet wanneer beide eenvoudig met elkander in aanraking worden gebragt. Men bereidt deze verbinding, zwavelwaterstof genoemd, gemakkelijk uit eene verbinding van zwavel met een metaal, hetwelk in staat is om onder de inwerking van een zuur het water te ontleden. Neemt men bijv. zwavelijzer en verdund zwavelzuur, dan verbindt zich het ijzer met de zuurstof van het water tot ijzeroxydule, terwijl de zwavel zich met de waterstof tot zwavelwaterstof (HS) verbindt; het ontstane ijzeroxydule verbindt zich met het zwavelzuur tot zwavelzuur ijzeroxydule (ijzervitriool) FeO, SO_3. Zwavelwaterstof is een kleurloos gas, dat een onaangenamen reuk heeft, die het meest met dien van vuile eijeren overeenkomt. Water lost een bijna drievoudig volume van dit gas op. Het is dit gas, dat aan de zoogenaamde zwavelbronnen haren onaangenamen reuk geeft.

Zwavelwaterstof heeft slechts zwakke zure eigenschappen; hare meest kenschetsende eigenschap bestaat in hare verhouding ten opzigte van de meeste metalen en hunne zouten, door welke zij namelijk ontleed wordt, onder vorming van zwavelmetalen; deze werking blijkt, wanneer men zwavelwaterstofwater (eene oplossing van dit gas in water) voegt bij eene oplossing van een metaalzout; het zwavelmetaal wordt dan als een meestal gekleurd poeder neergeslagen. Alleen in de zouten van de alkaliën en alkalische aarden (zie later onder K) ontstaat geen neerslag, terwijl de ijzeroxyd-zouten door dit gas, onder afscheiding van zwavel, in ijzeroxydul-zouten omgezet worden.

De zwavelwaterstof is een voorbeeld van de hierboven (26) vermelde waterstofzuren.

E. *Chloor* is een gas, dat echter in de natuur alleen verbonden met metalen voorkomt, en wel voornamelijk met natrium als chloornatrium, het gewone keukenzout. Men verkrijgt het door bruinsteen (mangaan-hyperoxyde) te verwarmen met chloorwaterstofzuur, eene verbinding van chloor met waterstof. De zuurstof van den bruinsteen ($Mn O_2$) verbindt zich met de waterstof van het zuur (H Cl), waarvan dus twee aeq. moeten aanwezig zijn, tot water. Van de vrij wordende twee aeq. chloor verbindt zich een aeq. met het mangaan-

metaal tot chloormangaan ($MnCl$), terwijl het andere in gasvormigen toestand ontwijkt. Het is een groenachtig geel gas, dat bijna $2\frac{1}{2}$ maal zwaarder is dan de dampkringslucht. Tot op $\frac{1}{5}$ van zijn gewoon volume zamengeperst, gaat het in eene groenachtig geele vloeistof over. Het lost zich in water op; van deze oplossing kan gebruik gemaakt worden als bleekmiddel, daar het chloor de eigenschap heeft van plantenkleuren te ontkleuren. Het vernietigt bovendien vele schadelijke uitwasemingen, en wordt daarom, met kalk en water verbonden, als zuiveringsmiddel van vertrekken gebruikt. Voor de inademing is het ongeschikt, daar het eene scherpe prikkelende werking uitoefent.

De verwantschap van het chloor tot metalen is zeer sterk; arsenicum en antimonium vatten vuur, als zij in fijn verdeelden toestand in droog chloorgas geworpen worden. Andere metalen behoeven slechts in chloorgas verhit te worden, om daarmede de zoogenaamde chloormetalen te vormen; deze verbindingen zijn alle in water oplosbaar, behalve het chloorzilver ($AgCl$) en het halfchloorkwikzilver (Hg_2Cl). Al deze chloorverbindingen kunnen als zouten beschouwd worden; van daar, dat het chloor, als ook het jodium, bromium en fluor, welke dezelfde eigenschap hebben, gewoonlijk zoutvormers (*halogenen*) genoemd worden.

Eene der belangrijkste verbindingen van het chloor is die met waterstof. Deze verbinding heeft sterk zure eigenschappen en wordt daarom *chloorwaterstofzuur* genoemd. De beide gassen vereenigen zich, als zij bij elkaar gebragt zijn, zoodra men er een brandend voorwerp in houdt, ja zelfs als zij aan de zonnestralen blootgesteld zijn, met eene ontploffing. Het gemakkelijkst bereidt men deze verbinding door keukenzout, chloorsodium ($NaCl$), met sterk zwavelzuur te verwarmen. Het in zwavelzuur bevatte water wordt ontleed; zijne zuurstof verbindt zich met sodium, en dit oxyde (NaO), gewoonlijk soda genoemd, met het zwavelzuur tot zwavelzure soda (NaO, SO_3), terwijl de waterstof zich met het chloor verbindt tot een kleurloos gas (HCl). Water neemt van dit gas, bij de gewone temperatuur, zijn 400voudig volume op. De oplossing van chloorwaterstofzuur is een der meest gebruikelijke zuren; men noemde het vroeger zoutzuur, omdat het uit het keukenzout bereid wordt, en die naam wordt er nog dikwijls aan gegeven.

Van de talrijke verbindingen van chloor met zuurstof vermelden wij slechts het onderchlorigzuur (ClO) en het chloorzuur (ClO_5). De gewoonlijk tot reiniging van vertrekken gebruikte zoogenaamde chloorkalk is een mengsel van onderchlorigzure kalk met chloorcalcium; daar het onderchlorigzuur slechts zwakke zure eigenschappen heeft, en zelfs door het in de lucht aanwezige koolzuur uit zijne verbinding verdreven wordt, wordt er gedurig onderchlorigzuur vrij, wanneer dit zout aan de lucht wordt blootgesteld; van daar zijne

zuiverende eigenschappen. Het gewone bleekwater (Eau de Javelle) is onderchlorigzure soda. De chloorzure zouten oefenen in de hitte eene hevige werking op brandbare zelfstandigheden uit; een mengsel van zoodanig zout met zwavel of kool ontploft, als het op gloeijende kolen geworpen wordt, en zelfs als men er een harden slag op geeft.

F. *Jodium* is een vast ligchaam, dat voorkomt als donkergraauwe blaadjes, die eenen vrij sterken metaalglans hebben. Bij verwarming gaat het in zeer schoone donker violette dampen over, die eenen eigendommelijken doch weinig prikkelenden reuk hebben. In de natuur komt het niet anders voor dan verbonden met metalen als jodiumverbindingen, voornamelijk in zeewater en in zeegewassen, ook in geringe hoeveelheid in sommige bronwateren. In water is het jodium zeer weinig oplosbaar, doch wel in alcohol of spiritus. De jodiumverbindingen hebben veel overeenkomst met de chloorverbindingen, hoewel de verwantschap van chloor tot metalen sterker is dan die van jodium, zoodat dit laatste door chloor uit zijne verbindingen wordt vrijgemaakt. Vrij jodium kan zelfs in de geringste hoeveelheid worden aangewezen, daar het de eigenschap heeft om zetmeel of stijfsel sterk blaauw te kleuren.

G. *Phosphorus* is bij de gewone temperatuur eene weeke, buigzame en in volkomen zuiveren toestand eenigzins doorschijnende zelfstandigheid. In de natuur komt zij niet onverbonden voor, maar wordt hoofdzakelijk bereid uit beenderen, waarvan phosphorzure kalk een der voornaamste bestanddeelen is. Phosphorus heeft eene zeer groote verwantschap tot zuurstof; bij de gewone temperatuur reeds verbindt hij zich daarmede; laat men een stukje phosphorus aan de lucht blootgesteld liggen, dan neemt men aan hetzelve een lichtgevenden rook waar, terwijl het na eenigen tijd geheel verdwenen zal zijn. Dit verschijnsel is niet anders dan eene langzame verbranding. Het is daarom noodig hem onder water te bewaren. Bij 60° ontbrandt de phosphorus met heldere vlam. Bij eene langzame verbranding wordt *phosphorigzuur* (PO_3) gevormd, bij snellere verbranding *phosphorzuur* (PO_5). Het eerste is een zeer zwak zuur, het tweede daarentegen een zeer sterk, dat bij hoogere temperatuur zelfs in staat is zwavelzuur uit zijne verbindingen vrij te maken.

Eene gasvormige verbinding van phosphor met waterstof (H_3P) heeft de eigenschap van in aanraking met de zuurstof van de lucht terstond te ontploffen. Men verkrijgt ze door phosphorus met eene sterke oplossing van potassa, of met gebluschten kalk te verhitten. Het water wordt alsdan ontleed, en terwijl zijne zuurstof zich met een gedeelte van den phosphorus verbindt, verbindt zich de waterstof met een ander gedeelte tot bovengenoemde gasvormige verbinding.

H. *Kiezel* is de grondstof van het kiezelzuur ($Si\,O_3$), dat als bergkristal,

kwarts, kwartszand, vuursteen, opaal, enz. voorkomt. Bovendien zijn verreweg de meeste rotssoorten kiezelzure zouten. Men heeft den kiezel zuiver bereid als een bruin poeder.

Van het kiezelzuur maakt men gebruik tot bereiding van het glas, dat verkregen wordt door zamensmelten van kwarts, potasch (koolzure potassa) of soda (koolzure soda), en kalk. Het glas is dus eigenlijk slechts een mengsel van kiezelzuren kalk en kiezelzure potassa (of kiezelzure soda). Sommige glassoorten, zoo als *flintglas*, bevatten loodoxyde in plaats van kalk.

I. *Koolstof* komt in verschillende toestanden voor: 1° volkomen zuiver en gekristalliseerd, als diamant, wiens grondvorm de regelmatige octaëder is; 2° in een vrij zuiveren toestand als graphiet of potlood; 3° onzuiver in alle soorten van kool, zoowel in de natuur als steenkolen, als in de kool, die men verkrijgt door dierlijke of plantaardige stoffen te verbranden met niet genoegzame toetreding van de lucht, dus als houtskool, dierlijke kool, beenzwart, zwartsel, enz. Alle organische stoffen bevatten koolstof, meestal met zuurstof en waterstof, dikwijls ook met stikstof en nog andere stoffen verbonden.

Koolstof heeft bij verhitting eene sterke verwantschap tot zuurstof, zoodat men er veelal gebruik van maakt, om aan oxyden de zuurstof te ontnemen, of ze te *reduceren*. De verbindingen welke dan ontstaan zijn of koolzuur (CO_2) of kooloxyde (CO). Eerstgenoemde is een gas dat men gemakkelijk bereidt door marmer of krijt, beide koolzuren kalk, met verdund zuur, hetzij zwavelzuur, hetzij zoutzuur, te overgieten. Daar deze zuren grooter verwantschap hebben tot den kalk, dan het koolzuur, zoo wordt dit uit zijne verbinding verdreven, als een kleurloos gas, zonder reuk, met eenen zwak zuren smaak, en ruim anderhalf maal zwaarder dan de lucht. Het is ongeschikt om de verbranding te onderhouden; hoewel evenmin in staat om het leven te onderhouden, oefent het er geenen schadelijken invloed op uit; het is ook altijd in den dampkring aanwezig, hoewel in geringe mate. Bij zeer lage temperatuur en sterke drukking kan het in vloeibaren staat verkregen worden. Water neemt dit gas op, en zijne oplossing kleurt blaauw lakmoespapier zwak rood. Koolzuur vormt met de basen zouten, van welke alle neutrale zouten in water onoplosbaar zijn behalve de koolzure alkalizouten. Vele zure zouten zijn daarentegen in water oplosbaar. Deze komen in de meeste minerale wateren voor, die aan het koolzuur, dat er in opgelost is, hunne opbruisende eigenschappen ontleden.

Met waterstof vormt de koolstof twee gasvormige verbindingen, het zware koolwaterstofgas (C_4H_4), en het ligte koolwaterstofgas (C_2H_4). Deze beide verbindingen ontstaan bij verhitting of zoogenaamde drooge destillatie van brand-

stoffen, zoo als turf, hout, steenkolen, ook van vette stoffen, zoo als olie was, vet, enz. Eerstgenoemd, ook olievormend gas genoemd, brandt aan de lucht met eene heldere vlam, terwijl het andere, veelal moerasgas genoemd, omdat het bij verrotting van organische stoffen onder water ontstaat, met eene weinig lichtgevende vlam verbrandt; beide verbindingen geven alsdan koolzuur en water. Het *lichtgas*, dat tot verlichting tegenwoordig algemeen gebruikt wordt, en verkregen wordt door in ijzeren retorten steenkolen, somtijds ook harsachtige of vette stoffen, te verhitten, is een mengsel van deze beide gassoorten, dat echter door vele andere stoffen verontreinigd is, waarvan het moet gezuiverd worden, alvorens het voor het gebruik geschikt is.

De zoo gevaarlijke ontploffingen in kolenmijnen worden gewoonlijk veroorzaakt door het zich daarin bevindende ligte koolwaterstofgas, dat met dampkringslucht vereenigd bij de minste aanraking met eene vlam hevig explodeert.

K. *Metalen.* Wij hebben boven (24) reeds kortelijk eenige eigenschappen der metalen vermeld; op de physische eigenschappen zullen wij in den loop van dit werk nog meermalen terugkomen, zoodat wij ons thans bepalen om met weinige woorden hunne scheikundige indeeling uiteen te zetten, welke voornamelijk berust op de eigenschappen hunner oxyden, die geschikt zijn om met zuren verbindingen aan te gaan, en dus als basis te dienen. Uit dit oogpunt verdeelt men ze in vier groepen.

1) *Alkalimetalen* zijn die, welke de sterkste verwantschap tot zuurstof hebben, en wier oxyden, *alkalien* genoemd, in water gemakkelijk oplosbaar zijn, zeer sterke basen vormen, en eene sterke alkalische reactie toonen, dat is, kurkuma-oplossing bruin en roodgemaakte lakmoes-oplossing blaauw kleuren. Hunne koolzure zouten zijn in water oplosbaar. Hiertoe behooren *potassium* en *sodium*.

2) *Alkalische aardmetalen* hebben ook eene sterke verwantschap tot zuurstof, doch minder dan de alkalische metalen. Hunne basische oxyden zijn kleurloos, minder in water oplosbaar dan de alkalien, vormen sterke basen en reageren alkalisch. Hunne koolzure zouten zijn in water onoplosbaar. Hiertoe behooren *calcium* en *magnesium*.

3) *Aardmetalen* hebben wederom minder verwantschap tot zuurstof, vormen kleurlooze en in water onoplosbare oxyden, die gewoonlijk aarden genoemd worden. Onder deze komt, behalve vele zeldzame metalen, het *aluminium* voor.

4) *Ertsmetalen.* Deze hebben de minste verwantschap tot zuurstof, waarmede sommige meer dan een basisch oxyde vormen, enkele zelfs verbindingen aangaan, die zich als zuren verhouden. Men splitst deze groote groep meestal weder in onderdeelen, namelijk:

a) Metalen, waarvan de zouten met magnesiazouten isomorph zijn (1); hieronder komen *mangaan*, *ijzer*, *kobalt*, *nikkel*, *zink*, *koper* en *lood* voor.

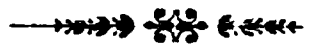
b) Metalen, wier zouten dezelfde eigenschap bezitten, doch met zuurstof bij voorkeur zuren vormen. Hiertoe behoort het *tin*.

c) Metalen, die met phosphorus isomorph zijn; *arsenicum*, *antimonium*, *bismuth*.

d) Edele metalen, wier oxyden door enkele verhitting alle zuurstof verliezen; *goud*, *zilver*, *kwikzilver*.

e) *Platinum* en de daarmede in de natuur steeds voorkomende metalen, zoo als *palladium*, *iridium*, enz.

Daar eene verdere uiteenzetting van de scheikundige eigenschappen der metalen en van hunne verbindingen, evenmin als de scheikunde der bewerktuigde natuur (organische scheikunde) tot het onderwerp der eigenlijke natuurkunde behoort, en hunne kennis voor het begrip van de physische verschijnselen der ligchamen niet noodig is, laten wij die hier achterwege, en verwijzen onze lezers daarvoor naar die werken, waarin uitsluitend over scheikunde gehandeld wordt.



(1) Bij de beschouwingen over de kristallen (20) is eene bepaling van *dimorphie* gegeven. Die van *isomorphie* lieten wij achterwege, omdat tot het regt begrip eenige zaken moesten voorafgaan, die eerst later konden behandeld worden. Men noemt zamengestelde ligchamen of zouten, die bij de kristallisatie een gelijken kristalvorm aannemen, isomorph, wanneer zij bovendien de eigenschap hebben, dat een element uit die verbinding door een ander element kan vervangen worden. Zegt men dus dat de koperzouten met magnesiazouten isomorph zijn, dan duidt men daarmede aan, dat in een magnesiazout, bijv. zwavelzure magnesia, het magnesium door koper kan vervangen worden, zonder dat de kristalvorm eene andere wordt; spreekt men van isomorphie tusschen phosphorus en arsenicum, dan wil men daarmede te kennen geven, dat de gelijkslachtige verbindingen gelijken kristalvorm hebben, zooals bijv. phosphorzure soda en arsenikzure soda, en dat dus de phosphorus de plaats van het arsenicum, en omgekeerd, kan innemen.

HOOFDSTUK III.

EVENWIGT EN BEWEGING BIJ VASTE LIGCHAMEN.

---

28. **Krachten, hare voorstelling.** — Reeds meermalen hebben wij de uitdrukking *kracht* gebruikt, als oorzaak van het een of ander verschijnsel; daar eene kracht evenwel steeds beweging voortbrengt, of althans zulks tracht te doen, indien de omstandigheden beweging onmogelijk maken, zoo kan men elke oorzaak, geschikt om beweging voort te brengen of te wijzigen, eene kracht noemen. Bij de krachten, wier werking in de natuur wordt waargenomen, heerscht eene groote verscheidenheid, vooral wat den aard der verschijnselen aangaat, die zij te weeg brengen; doch hare voorstelling als oorzaken van beweging biedt ons een middel aan, om ze met elkander te vergelijken. De grootte der beweging zal eene maat zijn van de grootte der kracht.

Eene kracht kan, óf slechts gedurende een kort oogenblik werken, zoo als geschiedt, wanneer twee ligchamen tegen elkander botsen; óf hare werking kan blijven voortduren gedurende al den tijd, dat de beweging duurt. Van deze laatste zullen wij een voorbeeld vinden in de zwaartekracht.

Indien door eene kracht geene beweging wordt voortgebragt, dan zal toch eene drukking of eene spanning het gevolg van hare werking moeten zijn; dit is bijv. het geval bij elk zwaar voorwerp, dat drukt op het ligchaam, dat zich er onder bevindt, of, opgehangen zijnde, de koord die het vasthoudt, spant.

Bij eene kracht zijn drie zaken op te merken: 1° het punt, waarop de kracht werkt, en dat haar *aangrijpingspunt* genoemd wordt; 2° hare *rigting*, dat is de rigting, volgens welke zij eene beweging bewerkt of tracht te bewerken; 3° hare *grootte*. Om deze laatste uit te drukken, moet eene eenheid aangenomen worden. Gewoonlijk neemt men daarvoor het gewigt van één pond. Hoewel deze eenheid eene kracht uitdrukt, in de rigting der zwaartekracht werkende, zoo kan men zich daarvan ook bedienen, wanneer de rigting eene andere is. De dynamometers (18) stellen ons in staat, om elke kracht met de zwaartekracht vergelijken, en door een gewigt uit te drukken.

Men is gewoon eene kracht voor te stellen door eene regte lijn; een der uiteinden duidt dan het aangrijpingspunt, en hare rigting de rigting der kracht aan.

De grootte der kracht wordt door de lengte der lijn voorgesteld; men kan daartoe die eenheid van lengtemaat nemen, welke men wil, mits zorg dragende, dat die dezelfde is voor alle krachten, welke men met elkander vergelijkt. Deze wijze van voorstelling heeft het voordeel, dat vele eigenschappen der krachten als meetkundige eigenschappen kunnen behandeld worden.

Het aangrijpingspunt eener kracht kan in de rigting der kracht verplaatst worden, zonder dat de uitwerking eene andere wordt.

29. **Evenwigt.** — Twee even groote doch tegenovergestelde krachten zullen, als zij in hetzelfde punt werken, elkander vernietigen. Doch ook wanneer meer krachten in verschillende rigtingen en op onderscheidene punten van een ligchaam werken, zal het kunnen gebeuren, dat zij elkander vernietigen, en dat hare gelijktijdige werking dus in den toestand van rust of beweging, waarin het ligchaam zich bevindt, geene verandering brengt. Men zegt dan, dat die krachten evenwigt met elkander maken, of ook wel, dat het ligchaam in evenwigt is. Hieruit volgt tevens, dat rust en evenwigt niet hetzelfde zijn; een ligchaam kan in beweging zijn, terwijl toch de krachten, die er op werken, evenwigt met elkander maken.

30. **Zamenstelling en ontbinding van krachten; resultante.** — Hoe groot ook het aantal krachten moge zijn, die een ligchaam in beweging trachten te brengen, hunne gelijktijdige werking zal toch aan dit slechts ééne beweging in eene bepaalde rigting kunnen mededeelen. Men kan zich echter ook eene enkele kracht voorstellen, die aan dat ligchaam juist dezelfde beweging zoude geven, en dus, daar hare uitwerking dezelfde is, voor al die andere krachten te zamen kan in de plaats gesteld worden. Die enkele kracht noemt men de zamengestelde of resultante van de krachten, voor welke zij in de plaats kan komen. Omgekeerd zal ook ééne enkele kracht door meer andere kunnen vervangen worden, zonder dat de werking eene andere zij. Die krachten noemt men dan de zamenstellende of ontbondene krachten. Wanneer bijv. AP, AQ en AR (Fig. 20) drie krachten voorstellen, op het punt A werkende, dan zal elke van die krachten aan dit eene beweging in hare eigene rigting trachten te geven; het gevolg hiervan zal zijn, dat het punt eene tusschenliggende rig-

Fig. 20.



ting AS volgt; deze beweging zoude er echter ook aan gegeven worden door eene enkele kracht. Stelt men, dat deze in de rigting van AS moet werken, dan zal AS de rigting der resultante zijn. De kracht AS zoude in evenwigt gehouden worden door eene even groote kracht AS′, die in tegenovergestelde rigting werkt; daar AS echter weder kan vervangen worden door de krachten AP, AQ en AR, waarvan zij de resultante is, kan men ook zeggen, dat de vier krachten AP, AQ, AR en AS′ te zamen evenwigt maken.

De theorie van de zamenstelling en ontbinding van krachten maakt den grond uit van de eigenlijke werktuigkunde, en wel bepaald van haar onderdeel, de statica, waarin de leer van het evenwigt behandeld wordt. Wij zullen hier slechts enkele gevallen kortelijk behandelen, die tot begrip van de eigenlijke natuurkunde onmisbaar zijn.

31. **Krachten, volgens ééne regte lijn werkende.** — Werken twee krachten op één punt en in dezelfde rigting, dan is hare resultante gelijk aan hare som; zij wordt uitgedrukt door het verschil, zoo de twee krachten in tegenovergestelde rigting werken. Zijn er meer krachten, waarvan sommige in de eene, andere in de tegenovergestelde rigting werken, dan is de resultante gelijk aan de som der eerste, verminderd met de som der tweede.

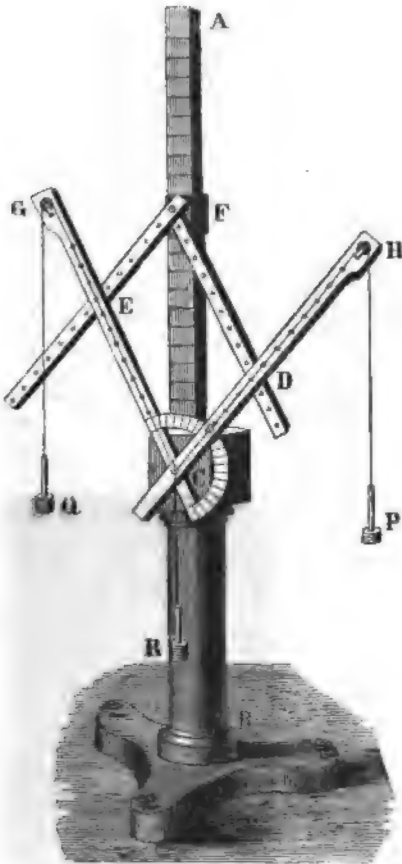
32. **Krachten in één punt werkende; parallelogram van krachten.** — Stellen wij, dat op een punt A (Fig. 21) twee krachten werken volgens de rigtingen AP en AQ, en dat hare grootte door de lijnen AB en AC wordt voorgesteld, dan zal de diagonaal van het parallelogram, dat AB en AC tot zijden heeft, zoowel de grootte als de rigting der resultante voorstellen. Deze belangrijke eigenschap, waarvan het wiskundig bewijs tot de eigenlijke statica behoort, kan echter door de volgende beschouwing toegelicht worden. Een in A zich bevindend ligchaam zoude, zoo de kracht P alleen er op werkte, zich bewegen in de rigting AP; onder de werking der kracht Q zoude het de rigting AQ volgen. Hoe grooter de kracht is, des te grooteren weg zal het ligchaam in denzelfden tijd afleggen; de lijnen AB en AC kunnen dus ook dienen om de wegen aan te duiden, die het ligchaam onder de werking van elke dier krachten in eene zelfde tijdseenheid, bijv. eene seconde, zoude doorloopen. Welken weg zal het nu afleggen onder de gelijktijdige

Fig. 21.



werking der beide krachten? De uitwerking zal dezelfde moeten zijn, als wanneer het eerst aan de werking der eene kracht, en daarna aan die der andere had gehoorzaamd. De kracht P brengt het in B; de kracht Q kan het nu niet van A naar C brengen, maar voert het langs een even grooten en gelijk gerigten weg van B naar D. De gezamenlijke werking van de beide krachten zal het dus in eens van A naar D moeten brengen. Daarheen zoude het echter ook gebragt zijn door eene kracht, welke volgens AD gerigt was, en die dezelfde verhouding had tot de krachten P en Q, als de weg AD tot de wegen AB en AC. Stellen AB en AC dus de krachten voor, dan zal AD hare resultante voorstellen.

Fig. 22.

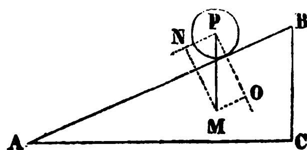


Proefondervindelijk kan men zich van de juistheid dezer eigenschap overtuigen door den toestel, in fig. 22 afgebeeld, en door Crahay (1843) uitgedacht. Op eenen houten voet, die door middel van drie stelschroeven horizontaal kan gesteld worden, bevindt zich eene vertikale kolom BCA, waarop van C af tot het bovenste uiteinde A verdeelingen zijn aangebragt. Twee koperen of houten staven CG en CH zijn in C vastgemaakt, waarom zij echter als om eene as kunnen draaijen. In deze staven zijn van C af gaatjes gemaakt, wier onderlinge afstand even groot is als de verdeelingen op AC. Twee andere staven FE en FD, die even zoo ingerigt zijn als CG en CH, zijn bevestigd aan eene schuif F, die langs CA op en neder geschoven, en met een schroefje daaraan vastgeklemd kan worden. Men kan dus, door deze vier staven in E en D met pennetjes aan elkander te

bevestigen, een parallelogram maken, waarvan de betrekkelijke lengten der zijden en van de diagonaal door het aantal gaatjes en door het aantal verdeelingen op CA worden aangewezen. In onze afbeelding zijn CD = EF = 6, CE = DF = 10 en CF = 14 genomen. Aan de uiteinden van de staven CG en CH bevinden zich twee ligt beweegbare katrolletjes, waarover twee koorden gebragt zijn, die beide in één punt verbonden zijn met eene derde koord CR. Worden nu aan de vrije uiteinden der koorden gewigten P, Q, R opgehangen, dan zullen op het punt, waar zij verbonden zijn, drie krachten werken in grootte voorgesteld door die gewigten, terwijl hare rigtingen die der koorden zullen zijn. Neemt men nu P = 6, Q = 10, R = 14, onverschillig welk gewigt men als eenheid heeft aangenomen, dan zal het stelsel dier drie krachten terstond eenen bepaalden evenwigtstoestand trachten aan te nemen, dien het juist zal aantreffen, als het verbindingspunt der koorden zich in C bevindt, en de krachten P en Q dus werken volgens de zijden CD en CE van het parallelogram. Daar de derde kracht R, die met deze twee evenwigt maakt, juist tegenovergesteld is aan de diagonaal CF van het parallelogram, zoo zal de resultante van P en Q volgens die diagonaal moeten gerigt zijn. Vergelijkt men de krachten met de lengten der zijden en der diagonaal van het parallelogram, dan ziet men terstond, dat CF ook de grootte der resultante aanduidt, als de zijden CD en CE de grootte van P en Q voorstellen. Men zal deze proef op vele wijzen kunnen herhalen, door de lengten der zijden te wijzigen. Het gemakkelijkste is het, de drie koorden aan een klein ringetje te bevestigen, en dit door middel van een pennetje bij C vast te steken, tot dat men de vereischte gewigten heeft opgehangen: neemt men dan het pennetje weg, dan zal het ringetje toch bij C blijven, en als het op zijde gedrukt wordt telkens weder tot dat punt terugkeeren. Aan de staaf CE is een verdeelde halve cirkel aangebragt, waarop men den hoek kan aflezen, dien de krachten P en Q met elkander maken.

Zoekt men de resultante van meer dan twee krachten, die in een zelfde punt werken, dan bepaalt men eerst de resultante van twee dier krachten, daarna de resultante van deze met de derde kracht, en zoo voort, tot men achtervolgens alle gegevene krachten heeft opgenomen.

Fig. 23.



De eigenschap van het parallelogram van krachten stelt ons ook in staat om eene kracht te ontbinden in twee andere, in hetzelfde punt volgens bepaalde rigtingen werkende. Men beproeft slechts een parallelogram te construëren, waarvan de gegevene kracht de diagonaal is, terwijl

de rigtingen der zijden door de aangewezene rigtingen der ontbondene krachten bepaald zijn. Laat, om dit op een voorbeeld toe te passen, AB (Fig. 23) eene helling voorstellen, waarop zich een ligchaam P bevindt, welks gewigt wij voorstellen door de vertikale lijn PM. Verlangt men nu te weten, hoe groot de kracht is, welke het ligchaam langs de helling zal doen afglijden, en welke drukking het op die helling uitoefent, dan moet de kracht PM ontbonden worden in twee andere, waarvan de eene evenwijdig met AB, de andere loodregt daarop gerigt is. Door een parallelogram te construëren, dat PM tot diagonaal heeft, en welks zijden de aangewezene rigtingen hebben, zal in dit geval de regthoek PNMO ontstaan; de zijde PN duidt dan de kracht aan, die het ligchaam langs de helling doet bewegen, terwijl PO de normale drukking op het vlak AB aanwijst.

33. **Evenwijdige krachten.** — Beschouwen wij eerst het geval, dat twee evenwijdige krachten, in twee punten van een zelfde ligchaam werkende, naar denzelfden kant gerigt zijn, zoo als (Fig. 24) P en Q, werkende in A en B, en voorgesteld door de lijnen AP en BQ. Daar twee in eene zelfde lijn doch in tegenovergestelde rigting werkende gelijke krachten elkander vernietigen, zoo mag men bij de krachten P en Q nog twee andere aannemen, in rigting en grootte voorgesteld door AS en BS′, zonder dat dit op het evenwigt van het geheel eenigen invloed kan uitoefenen. De resultante van AS en AP wordt voorgesteld door AC, die van BS′ en BQ door BD. Verplaatst men de aangrijpingspunten van deze nieuwe krachten volgens hare rigtingen, en wel beide in het ontmoetingspunt E dier rigtingen, dan kan men het beschouwen, als of zij daar werkten. Worden zij nu weder ontbonden, de eerste EC′ volgens twee rigtingen evenwijdig met AS en AP, de tweede ED′ volgens twee rigtingen evenwijdig met BS′ en BQ, dan verkrijgt men vier krachten, waarvan twee, EK en EL, gelijk zijn aan AS en BS′, en dus elkander vernietigen, terwijl de twee krachten EM en EN, die gelijk zijn aan AP en BQ, beide volgens de rigting EH werkende, bij elkander moeten gevoegd worden om de resultante te vinden. Hieruit volgt, dat de resultante der krachten P en Q, werkende in A en B, wordt uitgedrukt door eene kracht,

Fig. 24.

gelijk aan hare som en werkende in dezelfde rigting in eenig punt der lijn ER, bijv. in H. De lijn HR, gelijk genomen aan de som van AP en BQ, stelt dus die resultante voor.

De plaats van het punt H wordt aldus bepaald. Verlengt men PA en QB tot zij FG ontmoeten, dan is HE : EG = BQ : BS′,

$$HE : EF = AP : AS,$$

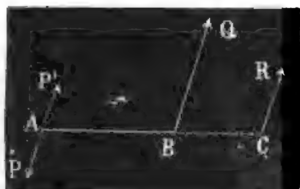
waaruit volgt:

$$AP : BQ = EG : EF,$$

$$\text{of} \quad P : Q = BH : AH.$$

Het aangrijpingspunt der resultante van twee evenwijdige krachten is dus zoodanig gelegen op de lijn, welke hare aangrijpingspunten vereenigt, dat de afstanden tot die punten omgekeerd evenredig zijn aan de grootte dier krachten.

Fig. 25.

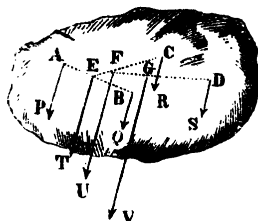


Deze eigenschap geeft ook het middel aan de hand om eene kracht te ontbinden in twee andere daarmede evenwijdige krachten, indien eene dier krachten en haar aangrijpingspunt gegeven is. Wij moeten hiervan gebruik maken bij de bepaling der resultante van twee evenwijdige, maar in tegenovergestelde rigting werkende krachten, zooals AP en BQ (Fig. 25). Men ontbinde de grootste kracht BQ in twee andere, waarvan de eene gelijk en tegenovergesteld is aan P, en dus door AP′ wordt aangegeven. De andere ontbondene R zal dan gelijk zijn aan het verschil van Q en P, terwijl haar aangrijpingspunt bepaald wordt door de evenredigheid R : P = AB : BC. De gelijke en tegenovergestelde krachten P en P′ vernietigen elkander, en de kracht R = Q—P blijft dus alleen over als resultante van Q en P. Haar aangrijpingspunt wordt aangewezen door de evengemelde evenredigheid, waaruit men afleidt $BC = \frac{AB \times P}{Q-P}$.

Het bijzondere geval dat Q en P even groot zijn verdient hier nog vermeld te worden. De afstand BC van het aangrijpingspunt der kracht Q tot dat der resultante wordt alsdan $\frac{AB \times P}{0} = \infty$; hetgeen te kennen geeft, dat twee evenwijdige en gelijke, doch in tegenovergestelde rigting werkende krachten geene resultante hebben, en dus ook niet door ééne enkele kracht kunnen in evenwigt gehouden worden. Zoodanig stelsel van krachten, dat men *koppel* noemt, zal aan het ligchaam, waarop het werkt, eene draaijende beweging geven, die slechts door het aannemen van *twee* vaste punten kan worden tegengehouden.

Werken meer dan twee evenwijdige krachten op een ligchaam (Fig. 26), dan zal men volgens den aangewezen regel eerst de resultante van twee dier krachten, bijv. P en Q, kunnen bepalen; deze zal gelijk zijn aan de som van P en Q, en werken in een punt E, zoodanig gelegen dat AE : EB = Q : P. Deze resultante T verbindt men weder met de derde kracht R, waardoor men eene nieuwe resultante U vindt, werkende in F. Door zamenstelling van deze met de vierde kracht S vindt men eene resultante V, werkende in G.

Fig. 26.



Het punt G, dat het aangrijpingspunt is van de resultante van al die evenwijdige krachten, wordt gewoonlijk *middenpunt van evenwijdige krachten* genoemd.

Van de verschillende gevallen van zamenstelling en ontbinding van evenwijdige krachten kan men zich gemakkelijk proefondervindelijk overtuigen, door aan verdeelde latjes met gewigten bezwaarde touwen vast te maken, die men over katrolletjes loopen laat; zulke katrollen veranderen wel de rigting der kracht, even als bij den toestel, dien wij beschreven hebben voor het bewijs van het parallelogram van krachten, maar op de grootte der kracht oefenen zij geenen invloed uit.

34. **Regtlijnige en kromlijnige beweging.** — Wij hebben beweegbaarheid als eene der algemeene eigenschappen der stof leeren kennen (10); de aard der beweging kan echter zeer verschillend zijn, wanneer men acht geeft hetzij op de rigting, hetzij op den afgelegden weg in een bepaalden tijd.

Uit het eerste oogpunt beschouwd wordt de beweging regtlijnig of kromlijnig genoemd, naar gelang hare rigting overal dezelfde blijft, of onophoudelijk verandert.

35. **Eenparige beweging.** — Worden in gelijke tijden, hoe klein die ook genomen worden, gelijke wegen doorloopen, dan heet de beweging eenparig. Den weg, in eene bepaalde eenheid van tijd, bijv. eene seconde, een uur, doorloopen, noemt men *snelheid;* bij eenparige beweging is de snelheid dus standvastig. Duidt men de snelheid aan door c, dan wordt de weg s, in eenen tijd t afgelegd, uitgedrukt door de formule

$$s = ct.$$

Bij gelijke snelheden zijn de doorloopene ruimten dus evenredig aan de tijden; bij gelijke tijden zijn zij evenredig aan de snelheden.

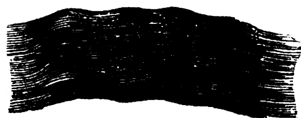
Eenparige beweging ontstaat, wanneer op een ligchaam eene kracht gedurende een zeer korten tijd werkt; is het eenmaal in beweging, dan blijft deze door

de inertie voortduren, tenzij tegenstanden van verschillenden aard de beweging vertragen, en eindelijk in rust doen overgaan.

36. **Veranderlijke beweging.** — Doorloopt een ligchaam in gelijke tijden ongelijke wegen, dan noemt men de beweging veranderlijk. De oorzaak van de verandering der beweging kan niet in het ligchaam zelf gelegen zijn, maar moet gezocht worden in de krachten, die er op werken. De snelheid is dus ook hier niet standvastig. Men verstaat bij veranderlijke beweging door snelheid op een bepaald oogenblik, de ruimte, die het van dat oogenblik af in de éénheid van tijd zoude doorloopen, indien de beweging eenparig werd. Is de verandering van snelheid zoodanig, dat hare vermeerdering of vermindering in een zelfden tijd standvastig is, dan noemt men de beweging *eenparig versneld* of *eenparig vertraagd.*

37. **Zamenstelling van snelheden.** — Wanneer wij de bepaling, die wij van snelheid gegeven hebben, in verband brengen met hetgeen hiervoren (32) gezegd is over de zamenstelling van krachten, die in één punt werken, dan kunnen wij daaruit het gevolg trekken, dat de resultante van twee snelheden, welke een ligchaam door twee verschillende oorzaken op hetzelfde oogenblik zoude moeten aannemen, eveneens in grootte en rigting wordt uitgedrukt door de diagonaal van het parallelogram, waarvan de zijden de grootte en rigting dier beide snelheden voorstellen. Wanneer zich bijv. in A (Fig. 27) een schip bevindt, dat door de werking van den stroom zich in de eenheid van tijd van A naar B zoude bewegen, dan stelt AB zijne snelheid voor; indien nu de wind in de rigting AC waaijende, het in dien zelfden tijd van A naar C drijven, en er dus eene snelheid AC aan geven zoude, dan zal het onder den invloed dier twee krachten in die tijdseenheid den weg van A tot D afleggen; de diagonaal AD van het parallelogram zal dus de resulterende snelheid aanduiden. Hieruit volgt dus ook, dat men, even als bij de krachten geschiedt, eene snelheid zal kunnen ontbinden in twee andere, waarvan de rigtingen gegeven zijn.

Fig. 27.



38. **Massa, hoeveelheid beweging.** — Door de krachten met gewigten te vergelijken, is men in staat hare onderlinge betrekking te bepalen. Eene betere, en vooral meer praktische maat der krachten is de uitwerking, die zij kunnen te weeg brengen. Die uitwerking zal bestaan in het mededeelen van eene zekere snelheid aan een of ander ligchaam; het is echter blijkbaar,

dat de *massa* van dat ligchaam daarbij niet buiten rekening mag gelaten worden. Door massa verstaat men, zoo als wij reeds gezegd hebben (12), alle stofdeeltjes, waaruit een ligchaam bestaat; zij moet dus afhankelijk zijn zoowel van den aard dezer stofdeeltjes, als van hun aantal. Dit laatste kan echter niet bepaald worden; wij moeten dus onze toevlugt nemen tot andere hulpmiddelen, om de massa van een ligchaam te leeren kennen. Daar alle ligchamen op de aarde aan de werking der zwaartekracht onderworpen zijn, beoordeelen wij hunne massa's naar hunne gewigten, daarbij tot grondslag aannemende, dat gelijke gewigten van verschillende stoffen evenveel stofdeeltjes bevatten. Een pond ijzer en een pond water hebben dus evenveel massa, hoewel het eerste een $7^1/_2$ maal grooter volume heeft. Dikwijls worden massa en gewigt verwisseld; uit het voorgaande blijkt echter, dat beide niet hetzelfde beteekenen; gewigt van een ligchaam is het gevolg van de werking der zwaartekracht op zijne massa. Wij zullen later (54) zien, dat de werking van de zwaartekracht niet overal op de aarde dezelfde is; dit moet ten gevolge hebben, dat een ligchaam niet overal even zwaar is; op zijne massa kan dit echter geen invloed uitoefenen. Wanneer men dus zegt, dat massa en gewigt evenredig met elkander zijn, dan is dit in de onderstelling, dat een zelfde ligchaam op alle plaatsen even zwaar is.

Om aan eene twee-, drie-, viermaal grootere massa na verloop van een bepaalden tijd eene zekere snelheid mede te deelen, zal men ook twee-, drie-, viermaal meer kracht moeten aanwenden. Zijn daarentegen twee massa's even groot, doch wil men aan de eene na een bepaalden tijd eene twee-, drie-, viermaal grootere snelheid geven, dan zal eveneens de kracht evenveel maal grooter moeten genomen worden. Bij ongelijke massa's M en M' en ongelijke snelheden na eenen zelfden tijd V en V' zullen dus twee krachten K en K' zich moeten verhouden in de zamengestelde reden van massa en snelheid, dus

$$K : K' = MV : M'V'.$$

Dit product van massa en snelheid noemt men de hoeveelheid beweging; men kan dus zeggen, dat twee krachten tot elkander in reden zijn, als de hoeveelheden beweging, die zij in eene zelfde eenheid van tijd voortbrengen.

De hoeveelheid beweging kan dus dienen als maat van de kracht, door welke de beweging voortgebragt is; dikwijls zegt men, dat zij gelijk is aan de kracht. Dit is echter onjuist, daar de kracht eene grootheid is, die zich door een bepaald gewigt laat voorstellen, terwijl de hoeveelheid beweging slechts een getal is, dat dient om de uitwerking dier kracht uit te drukken. Wanneer men dus zegt $K = MV$, dan bedoelt men daarmede, dat de eenheid van kracht evenveel maal in K begrepen als de eenheid van hoeveelheid beweging in MV.

Wanneer een kogel van 2 pond eene snelheid van 300 meters heeft, nadat hij zich gedurende eene seconde bewogen heeft, dan wordt de hoeveelheid beweging voorgesteld door het getal 600, indien men het gewigt in plaats van de massa neemt. Heeft een andere kogel van 4 pond na dien zelfden tijd eene snelheid van 150 meters, dan zal de hoeveelheid beweging eveneens 600 bedragen. De krachten, die oorzaken waren van die bewegingen, moeten dus even groot geweest zijn. Had daarentegen de tweede kogel eene snelheid 500 gekregen, zoodat zijne hoeveelheid beweging 2000 was, dan zouden de krachten tot elkander in reden staan als 600: 2000; de tweede kracht was dus $3^1/_3$ maal grooter dan de eerste.

39. **Botsing van vaste ligchamen.** — De beschouwing van de hoeveelheid beweging stelt ons in staat, om na te gaan, welke verschijnselen er moeten plaats hebben, wanneer twee ligchamen, die zich in dezelfde rigting maar met verschillende snelheden bewegen, tegen elkander aanbotsen. Nemen wij eerst het geval, dat beide ligchamen geheel zonder veêrkracht zijn, dan zullen zij, als zij tegen elkander aankomen, tegen elkander gedrukt worden en eene geringe vervorming ondergaan, en daarna, als 't ware slechts ééne massa uitmakende, met eene gemeenschappelijke snelheid verder gaan. De totale hoeveelheid beweging kan echter geene verandering hebben ondergaan; zij kan alleen van het eene in het andere ligchaam zijn overgegaan. Zijn m en m' de massa's, v en v' de snelheden, dan zijn de hoeveelheden beweging mv en $m'v'$; noemt men de snelheid na den schok u, dan zal de hoeveelheid beweging $(m + m')\,u$ wezen, en, daar deze gelijk moet zijn aan $mv + m'v'$, zal men vinden

$$u = \frac{mv + m'v'}{m + m'}.$$

Berekent men hieruit de vermindering in snelheid $v - u$ van het eene ligchaam en de vermeerdering $u - v'$ van het andere, dan bevindt men, dat $v - u : u - v' = m' : m$. Wanneer dus twee niet veêrkrachtige ligchamen tegen elkander botsen, dan zullen de vermeerdering en vermindering in snelheid dier beide ligchamen omgekeerd evenredig zijn aan hunne massa's.

Bewegen zich de ligchamen in tegenovergestelde rigting, dan heeft men in de waarde van u slechts eene der snelheden negatief te nemen; u zal in dat geval nul worden, wanneer $mv = m'v'$, dat is, wanneer beide ligchamen gelijke hoeveelheid beweging hebben.

Zijn de ligchamen daarentegen veêrkrachtig, dan zullen de verschijnselen in het begin wel dezelfde zijn als bij weeke ligchamen; maar de indrukking of vervorming, die zij hebben ondergaan, kan niet blijven bestaan (indien ten

minste de grens der veerkracht niet overschreden is); de ligchamen trachten hunne oorspronkelijke gedaante te hernemen, en oefenen dus door hunne veêrkracht in de punten, waar zij met elkander in aanraking zijn, eene drukking op elkander uit. De massa van het eene ligchaam blijft dus op het andere drukken, tot dat de verplaatste deeltjes weder hunne oorspronkelijke plaats ingenomen hebben; daarbij zal noodzakelijk nogmaals eene gelijke hoeveelheid beweging van het eene ligchaam op het andere overgegaan zijn, als gedurende het eerste gedeelte van den schok.

Neemt men dit in aanmerking, dan is het gemakkelijk de eindsnelheden van twee volkomen veêrkrachtige ligchamen te berekenen; de gemeenschappelijke snelheid u moet dan voor elk der beide ligchamen nogmaals verminderd of vermeerderd worden met eene gelijke hoeveelheid, als de vermindering of de vermeerdering gedurende het eerste gedeelte bedroeg. Noemt men de eindsnelheden V en V′, dan zal men dus vinden

$$V = u - (v - u), \quad V' = u + (u - v');$$

wordt hierin de waarde van u in de plaats gesteld, dan is

$$V = \frac{(m - m')\,v + 2m'v'}{m + m'}, \quad V' = \frac{(m' - m)\,v' + 2mv}{m + m'},$$

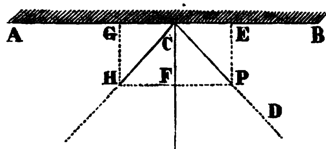
welke algemeene uitdrukkingen echter voor sommige gevallen veel eenvoudiger worden. Zijn de massa's even groot, dan vindt men $V = v'$, $V' = v$; botsen dus twee ligchamen, die gelijke massa hebben, tegen elkander, dan gaat de snelheid van het eene in het andere over. Is het eene ligchaam in rust en dus $v' = 0$, dan zal $V = 0$, $V' = v$, zijn; het achterste ligchaam blijft dus liggen, terwijl het voorste vooruitgaat met de snelheid, die het andere vóór den schok had. Loopen de ligchamen tegen elkander in, en is dus v' negatief, dan zal elk ligchaam terugkeeren, met de snelheid van het andere.

Is het tweede ligchaam in rust en zeer groot, zoodat men v' 0 heeft, en m in vergelijking van m' kan verwaarloosd worden, dan vindt men $V = -v$; het ligchaam zal dus met eene even groote snelheid, doch in tegenovergestelde rigting zich bewegen. Dit zal het geval zijn, wanneer een veêrkrachtige bal loodregt tegen eenen onbewegelijken, doch veêrkrachtigen wand aankomt.

De uit de formules afgeleide verschijnselen kunnen ook proefondervindelijk aangetoond worden; voor niet veêrkrachtige ligchamen neemt men ballen van natte klei of lood, voor veêrkrachtige het liefst ivoren ballen, die men aan touwen ophangt, en dan tegen elkander laat botsen. Heeft men bijv. twee even groote ivoren ballen naast elkander opgehangen, en laat men den eenen, na hem wat op zijde gebragt te hebben, los, dan zal hij tegen den anderen,

die in rust is, aankomen, dien zijne snelheid mededeelen, doch zelf in rust blijven. De tweede bal komt daarna weder tegen den eersten aan, die op zijne beurt met dezelfde snelheid weggaat, terwijl de tweede in rust blijft. Heeft men op dezelfde wijze meer ballen naast elkander opgehangen, en komt de uiterste bal met zekere snelheid tegen den eerstvolgenden aan, dan gaat de hoeveelheid beweging van elken bal op den naastvolgenden over, en alleen de laatste zal zich verwijderen met eene snelheid, even groot als die, waarmede de eerste aangekomen was.

Fig. 28.



Komt een veêrkrachtig ligchaam onder eenen hoek DCB (Fig. 28) tegen een wand AB aan met eene snelheid, die wij door PC voorstellen, dan kan deze ontbonden worden in twee andere, waarvan de eene EC langs den wand gerigt zijnde, door den schok geene verandering kan ondergaan. De andere ontbondene FC daarentegen zal, volgens het zoo even opgemerkte, na den schok even groot doch tegenovergesteld in rigting zijn; om dus de rigting te vinden, volgens welke het ligchaam zich weder van den wand verwijderen zal, moet men de resultante zoeken van CF en CG, welke laatste even groot als EC genomen is. Men vindt dan voor de snelheid na den schok CH, welke even groot als CP zal zijn, terwijl de hoek HCG gelijk zal zijn aan DCB. De hoeken DCF en HCF, welke de rigtingen met de loodlijn CF maken, en die de hoeken van *invalling* en van *terugkaatsing* genoemd worden, zullen dus even groot zijn. Ook hiervan kan men zich gemakkelijk proefondervindelijk overtuigen. Men zal echter bevinden, zoo de wand niet volkomen veêrkrachtig is, dat de hoek van terugkaatsing een weinig grooter is dan die van invalling.

40. **Zwaartepunt.** — Elk zwaar ligchaam kan beschouwd worden als de vereeniging van een groot aantal moleculen, die alle aan de werking der zwaartekracht onderworpen zijn. Het gewigt van elk stofdeeltje is dan eene kracht; en daar de rigting der zwaartekracht voor de verschillende deelen van een zelfde ligchaam als dezelfde mag aangenomen worden (12), zoo kunnen wij het beschouwen, als of op de deeltjes van een zwaar ligchaam evenwijdige krachten werken. De resultante dier evenwijdige krachten kan bepaald worden (33), zoowel als haar aangrijpingspunt. De resultante zelve kan klaarblijkelijk niet anders zijn, dan het geheele gewigt van het ligchaam; het aangrijpingspunt, dat een middenpunt van evenwijdige krachten zijn moet, wordt voor de zwaartekracht het zwaartepunt genoemd. Het zwaartepunt van een ligchaam is dus dat punt, waarin men zich kan voorstellen, dat het geheele gewigt van het ligchaam werkt. Is dus het zwaartepunt van een

ligchaam ondersteund, dan zal het in evenwigt zijn, in welken stand het zich ook moge bevinden, zoo lang geene uitwendige kracht dit komt verstoren.

De plaats van het zwaartepunt van een ligchaam kan proefondervindelijk bepaald worden, door het achtervolgens in twee verschillende punten op te hangen; in beide standen zal het zwaartepunt onder het ophangpunt moeten gelegen zijn, daar er anders geen evenwigt kan zijn; het ontmoetingspunt van de twee lijnen, die in die twee standen vertikaal door het ophangpunt getrokken worden, zal dus het zwaartepunt moeten zijn.

Men spreekt dikwijls van het zwaartepunt van vlakken en lijnen. Daar deze, als niet ligchamelijk zijnde, geen zwaarte hebben, kunnen zij eigenlijk ook geen zwaartepunt hebben. Men stelt zich dan alle punten dier figuren als zware moleculen voor, en het zwaartepunt is dus eigenlijk slechts het middenpunt van de evenwijdige en gelijke krachten, die men onderstelt dat in alle punten van die figuren werken. Zoo kan men dan zeggen, dat het zwaartepunt van eene regte lijn in haar midden gelegen is; dat van een cirkel en van een regelmatigen veelhoek in het middenpunt, van een parallelogram in het snijpunt der diagonalen, omdat in alle deze figuren aan weêrszijde van elke lijn, door dat punt getrokken, volkomen gelijke en symmetrische gedeelten gelegen zijn. Het zwaartepunt van een driehoek ligt op $^2/_3$ van de lijn, die van een der hoekpunten naar het midden der overstaande zijde getrokken wordt, van den top af gerekend, of wat hetzelfde is, in het ontmoetingspunt der lijnen, die uit de hoekpunten naar het midden der overstaande zijden getrokken worden. Dat van een willekeurigen veelhoek bepaalt men, door hem in driehoeken te verdeelen, van elk van deze het zwaartepunt te bepalen, en dan door zamenstelling van alle evenwijdige krachten in die punten werkende, het aangrijpingspunt der resultante te bepalen.

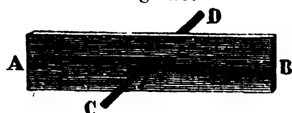
Bij alle homogene ligchamen, die een middenpunt hebben, is dit tevens het zwaartepunt. Bij een bol ligt het in het middenpunt, bij een cilinder in het midden der as, bij een parallelopipedum in het snijpunt der diagonalen. Bij eene driehoekige piramide is het gelegen op $^1/_4$ van de lijn, die van den top naar het zwaartepunt van het grondvlak getrokken wordt, van het grondvlak af gerekend; bij den kegel eveneens op $^1/_4$ van de as.

41. **Evenwigt van zware ligchamen.** — Opdat een zwaar ligchaam in evenwigt zij, is het noodig en voldoende, dat het steunpunt of ophangpunt zich in dezelfde vertikaal bevinde, waarin het zwaartepunt gelegen is. Er kunnen zich hier echter verschillende gevallen voordoen, afhankelijk van de plaats die het zwaartepunt ten opzigte van het steunpunt inneemt.

Wanneer het zwaartepunt Z juist in het steunpunt gelegen is, zooals

in fig. 29, waar AB een zwaar ligchaam voorstelt, dat om eene as CD draaijen kan, dan zal er evenwigt zijn, onverschillig in welken stand AB geplaatst is; men noemt daarom dezen stand *onverschillig* evenwigt.

Fig. 29.



Ligt het zwaartepunt onder het vaste punt, zoo als in fig. 30, dan zal het ligchaam, uit den stand AB in den stand AB′ gebragt, niet meer in evenwigt zijn. Wordt het dan weder aan zich zelf overgelaten, dan zal het, daar het zwaartepunt altijd den laagst mogelijken stand tracht in te nemen, van zelf weder in den stand AB komen; men zegt dan, dat het evenwigt *standvastig* is.

Fig. 30.

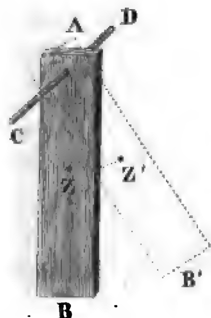
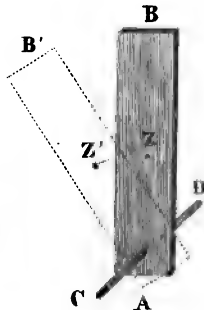


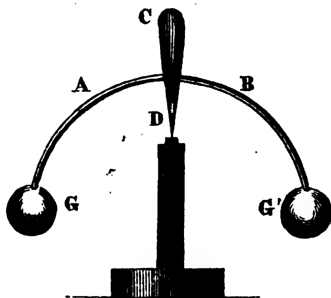
Fig. 31.



Bevindt zich eindelijk het ligchaam in den stand van fig. 31, waarin het zwaartepunt Z boven het vaste punt gelegen is, dan zal dit, zoo het ligchaam in den stand AB′ gebragt wordt, in Z′ komen, en dus lager dan in den evenwigtstoestand. Wordt het nu losgelaten, dan zal de zwaartekracht het nog verder van den evenwigtstoestand brengen, die daarom *veranderlijk* of *onstandvastig* genoemd wordt.

Als een voorbeeld van standvastig evenwigt kan de toestel dienen, in fig. 32 voorgesteld. Wanneer men het met eene scherpe punt D voorziene hout C alleen op de punt wilde laten staan, zoude het onmogelijk zijn het in dien stand van veranderlijk evenwigt te houden, daar het zwaartepunt zich dan boven het steunpunt zoude moeten bevinden. Voorziet men het echter van een ijzerdraad AB, waaraan twee metalen ballen G en G′ bevestigd zijn, dan zal het zwaartepunt van den toestel veel lager liggen en wel onder de punt D, zoodat het zich nu in standvastig evenwigt bevindt. Deze toestel kan tevens tot voorbeeld

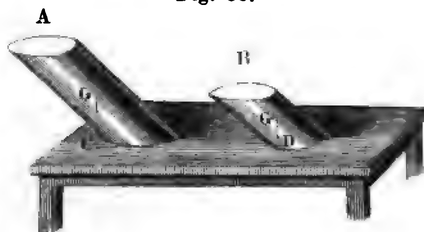
Fig. 32.



strekken, dat het zwaartepunt van een ligchaam buiten hetzelve kan gelegen zijn.

Wanneer een ligchaam met meer punten of wel met eene uitgebreide basis op een horizontaal vlak staat, dan zal het in evenwigt zijn, als de vertikaal, door het zwaartepunt gaande, dat vlak ontmoet binnen die basis, of, zoo er slechts eenige steunpunten zijn (zooals bijv. bij eene tafel, die op onderscheiden pooten rust), binnen den veelhoek, door de uiterste dier punten getrokken. Heeft dit niet plaats, dan zal het ligchaam omkantelen, zoo als zal plaats hebben bij den scheven cilinder A (Fig. 33), omdat de vertikaal GC de tafel buiten de basis ontmoet; terwijl de cilinder B zal blijven staan, omdat het ontmoetingspunt D hier binnen den omtrek der basis valt. Een ligchaam zal dus ook deste vaster staan, naarmate zijne basis grooter is; want dan zal de kans, dat de vertikaal van het zwaartepunt daar buiten komt, zooveel te geringer zijn.

Fig. 33.



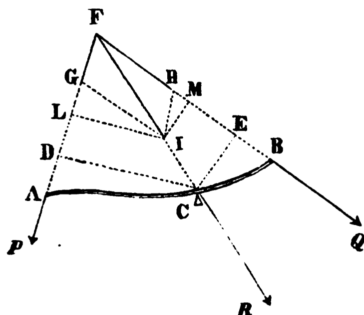
Bij de menschen heeft hetzelfde plaats. De vertikaal door het zwaartepunt getrokken, moet den grond ontmoeten binnen de basis, gevormd door den buitensten omtrek der voeten en de twee regte lijnen, die de toonen en de hielen vereenigen. Daarom kan iemand, die vlak tegen den muur staat, zich niet voorover buigen, omdat zijn zwaartepunt dan zooveel vooruitkomt, dat het niet meer ondersteund is. Iemand, die een zwaren last op den rug draagt, zal zich voorover buigen, ten einde het zwaartepunt, dat door den last naar achteren gebragt was, weer naar voren te verplaatsen. Al onze bewegingen bij het loopen, enz. dienen om het zwaartepunt steeds goed te ondersteunen.

42. **Hefboom.** — Wij hebben reeds herhaaldelijk gesproken van het gewigt der ligchamen; het is echter noodig, dat wij ook de middelen en werktuigen leeren kennen, waarvan men zich bedient, om het met naauwkeurigheid te bepalen. De gewone weegschaal of balans wordt het meest daartoe gebruikt. Alvorens echter tot eene beschrijving en verklaring van dezen toestel te kunnen overgaan, moeten wij den hefboom en zijne theorie leeren kennen.

Een hefboom is eene onbuigbare staaf AB (Fig. 34), die om een vast punt C kan draaijen, dat *steunpunt* genoemd wordt. Op deze staaf werken in twee

verschillende punten A en B twee krachten P en Q, waarvan elke haar in beweging tracht te brengen. De loodlijnen CD en CE uit het steunpunt op de rigtingen der krachten neêrgelaten, worden *hefboomsarmen* genoemd. Opdat de hefboom in evenwigt zij, moeten de beide krachten vooreerst zoodanig gerigt zijn, dat elke op zich zelve hem eene beweging in tegenovergestelde rigting geeft. Voorts moet hare resultante door het steunpunt gaan; want was dit niet het gèval, en werkte zij regts of links van het punt C, dan zoude zij, niet meer op een vast punt werkende, beweging voortbrengen. Verlengen wij dus de rigtingen der krachten, tot zij elkander in F ontmoeten, en verplaatsen wij de krachten in dat punt, door FG = P, FH = Q te maken, dan zal FI de resultante voorstellen, en, volgens het zoo even opgemerkte, verlengd zijnde door C moeten gaan. Trekt men uit I de loodlijnen IL en IM, dan volgt uit de gelijkvormigheid der driehoeken ILG en IMH de evenredigheid IH : IG = IM : IL; daar echter IM : IL = CE : CD, en IH = FG = P, IG = FH = Q is, zoo zal men hebben P : Q = CE : CD, of in woorden: *de krachten zijn omgekeerd evenredig aan de hefboomsarmen.*

Fig. 34.



Is de hefboom regt, en zijn de beide krachten evenwijdig, dan kan men eenvoudiger zeggen, dat de krachten omgekeerd evenredig zijn aan de afstanden van het steunpunt tot de aangrijpingspunten der krachten. Men wachte zich evenwel die afstanden voor de hefboomsarmen zelven te houden, hetgeen alleen het geval zal zijn, als de krachten loodregt daarop werken.

De gevondene evenredigheid kan ook onder den vorm P × CD = Q × CE gezet worden; zij drukt dan uit, dat in den evenwigtstoestand de producten van elke kracht met haren hefboomsarm gelijk zijn. Zoodanig product noemt men het *statisch moment* der kracht.

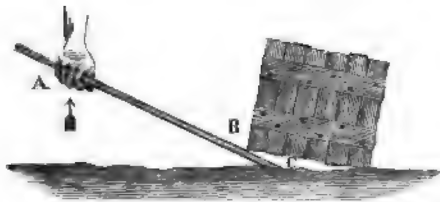
Fig. 35.



Van de beide krachten die op een hefboom werken, zal de eene in de meeste gevallen dienen om beweging voort te brengen, terwijl de andere den weêrstand voorstelt, dien men tracht te overwinnen. Daarom noemt men veelal de eerste *kracht*, de tweede *last*.

Met het oog op deze onderscheiding verdeelt men veelal den hefboom in drie soorten. Bij de eerste soort bevindt zich het steunpunt tusschen kracht en last. In fig. 35 is C het steunpunt, de last van den steen drukt in B vertikaal naar beneden, terwijl in A eene kracht aangewend wordt, eveneens vertikaal naar beneden gerigt. Kracht en last zullen zich hier verhouden als BC tot CA; hoe kleiner men dus BC maakt in vergelijking van CA, met des te minder kracht zal men den steen kunnen opligten.

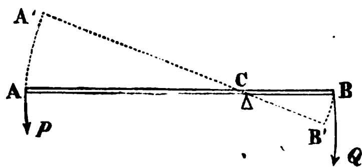
Fig. 36.



Gebruikt men daarentegen den hefboom, zoo als in fig. 36 is aangewezen, dan zal het uiteinde C steunpunt zijn, terwijl de last in B, en de kracht in A, doch in tegenovergestelde rigting, werkt. Deze is een hefboom van de tweede soort, of, zooals men hem dikwijls noemt, een eenarmige hefboom, omdat de beide armen (waarvoor men hier, waar het slechts om de verhouding te doen is, CB en CA mag nemen), zich aan denzelfden kant van het steunpunt bevinden. Bij dezen zal de kracht dus altijd kleiner zijn dan de last.

Bij de derde soort van hefboomen is ook het steunpunt aan het uiteinde geplaatst, doch laat men de kracht digter bij het steunpunt werken dan de last. Hier moet dus de kracht grooter zijn dan de last; men bedient zich er dan ook niet van, om kracht te besparen, zoo als bij de hefboomen van de eerste en tweede soort het geval is, maar om in snelheid te winnen; dit is onder anderen het geval bij de pedaal van een slijpsteen, spinnewiel, draaibank, enz., ook bij de spieren in het menschelijk ligchaam.

Fig. 37.



Eene eenvoudige beschouwing van fig. 37 is voldoende om ons te doen inzien, dat bij elken ongelijkarmigen hefboom AB aan den grooteren arm AC wel eene kleinere kracht P werkt, maar dat de weg AA', door het aangrijpingspunt A der kracht P beschreven, evenveel maal grooter is dan die, welke door het aangrijpingspunt B van den last Q in denzelfden tijd beschreven wordt. Men drukt dit het eenvoudigst uit door te zeggen: *wat men in kracht wint, verliest men in snelheid, en omgekeerd.*

Het geval kan zich voordoen, dat op een hefboom meer dan twee krachten werken. Zal er evenwigt zijn, dan moet ook dan weder voldaan zijn aan de voorwaarde, dat de statische momenten gelijk moeten wezen. Men moet dit dan in dien zin verstaan, dat de statische momenten van de krachten, die den hefboom eene beweging in denzelfden zin zouden geven, bij elkander moeten gevoegd worden; en dat dus de som van de statische momenten der krachten, die hem eene beweging in de ééne rigting trachten te geven, gelijk moet zijn aan de som der momenten van de krachten, welke eene tegenovergestelde beweging zouden ten gevolge hebben.

43. **Weegschaal.** — De gewone balans of weegschaal is een gelijkarmige hefboom van de eerste soort, aan wiens beide uiteinden twee schalen zijn opgehangen, waarvan de eene het te wegen voorwerp, de andere een zeker aantal gewigten moet bevatten. De hefboom wordt *evenaar* of *juk* genoemd; het punt waarin de evenaar rust, heet *steunpunt*, de punten waaraan de schalen zijn opgehangen, worden *ophangpunten* genoemd.

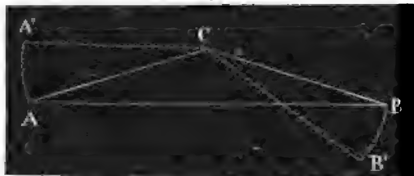
Eene goede weegschaal moet eenen horizontalen stand aannemen, wanneer op beide schalen gelijke gewigten geplaatst zijn; wordt zij uit dien stand gebragt, dan moet zij van zelve daartoe terugkeeren. Zijn de gewigten ongelijk, dan moet zij, zelfs bij een gering verschil, eenen schuinen stand aannemen. Laat ons nagaan hoedanig hare inrigting moet zijn, om aan deze voorwaarden te voldoen.

In de eerste plaats is het noodig, dat de beide armen, dat is, de afstanden der ophangpunten tot het steunpunt gelijk zijn; want was dit niet het geval, dan zouden in den evenwigtstoestand de gewigten niet gelijk kunnen zijn, maar omgekeerd evenredig aan de hefboomsarmen. Men kan zich proefondervindelijk overtuigen, of eene weegschaal deze eigenschap heeft, door op beide schalen gewigten te plaatsen, tot dat de evenaar eenen horizontalen stand aanneemt, en ze dan om te wisselen; blijft hij dan nog horizontaal, dan is men zeker, dat de armen even lang zijn. Het spreekt van zelf, dat men zich eerst moet overtuigen, dat de evenaar ook horizontaal is, als zich geen gewigten op de schalen bevinden.

De hefboomsarmen moeten echter niet alleen gelijk zijn, als de evenaar eenen horizontalen stand aanneemt, maar zij moeten in alle standen gelijk blijven. Dit zal alleen het geval zijn, wanneer het steunpunt gelegen is in de lijn, die de ophangpunten vereenigt; men heeft alsdan namelijk een gelijkarmigen regtlijnigen hefboom, bij welken, daar de krachten evenwijdig zijn, de armen in elken stand aan elkander gelijk blijven. Ligt het steunpunt C (Fig. 38) daarentegen boven de lijn AB, tusschen de ophangpunten A en B

getrokken, dan zullen wel in dezen stand de beide hefboomsarmen even groot zijn; maar als de evenaar den stand A′CB′ aanneemt, dan zal de linker-hefboomsarm grooter zijn, terwijl de regterarm kleiner is geworden. Gelijke gewigten, in A′ en B′ opgehangen, kunnen nu niet meer evenwigt met elkander maken.

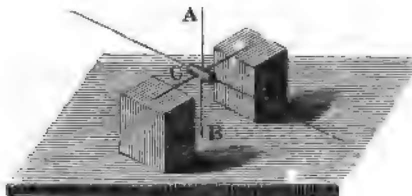
Fig. 38.



Als het steunpunt beneden AB gelegen is, zal hetzelfde het geval zijn. Wij zien dus, dat het verkieslijk is, dat het steunpunt en de beide ophangpunten in eene regte lijn liggen.

Eene bruikbare weegschaal moet, als de evenaar uit den horizontalen stand gebragt wordt, van zelve tot dien stand terugkeeren, wanneer namelijk de beide schalen gelijk belast zijn. Of dit geschiedt, zal enkel afhangen van de plaats van het zwaartepunt van den evenaar, ten opzigte van het steunpunt. Ligt het zwaartepunt in het steunpunt, dan is er een onverschillig evenwigt, en de evenaar zal dus, in een schuinen stand gebragt zijnde, dien behouden. Is het zwaartepunt boven het steunpunt gelegen, dan hebben wij een toestand van veranderlijk evenwigt, welke evenzeer de balans onbruikbaar zoude maken. Het zwaartepunt moet dus beneden het steunpunt gelegen zijn in de lijn, loodregt getrokken op die, welke de ophangpunten vereenigt. Men kan zich hiervan proefondervindelijk overtuigen door den eenvoudigen toestel in fig. 39 afgebeeld. Men neemt eene geheele en twee halve breinaalden, die men door eene kurk steekt.

Fig. 39.



De geheele breinaald stelt dan den evenaar voor; de eene halve naald verbeeldt de as waarom hij draaijen kan, terwijl men door de andere op of neêr te schuiven het zwaartepunt van den geheelen toestel kan verplaatsen. Is AB juist half door de kurk gestoken, dan zal er in alle standen evenwigt zijn; is AC kleiner dan BC, dan zal er bestendig evenwigt zijn; is daarentegen AC grooter dan BC, en dus het zwaartepunt boven het steunpunt gelegen, dan is er veranderlijk evenwigt, en de toestel slaat om, zoodra hij uit den horizontalen stand wordt gebragt.

De evenaar moet voorts eenen schuinen stand aannemen, wanneer in de eene schaal een klein overwigtje geplaatst wordt, opdat zelfs een gering verschil in de gewigten op de beide schalen terstond aangewezen worde. Eene balans

die deze hoedanigheid heeft, wordt *gevoelig* genoemd. Eerst na eenige schommelingen zal de evenaar tot rust komen; den hoek, dien hij dan maakt met den horizontalen stand, noemt men den *doorslag*. Eene gevoelige balans moet dus bij eene aanzienlijke belasting en een gering overwigtje een merkbaren doorslag geven. Men drukt den graad van gevoeligheid of *fijnheid* gewoonlijk uit door eene breuk, waarvan de teller het overwigtje en de noemer het geheele gewigt in de schalen is.

Fig. 40.



De plaats van het zwaartepunt zal eenen grooten invloed uitoefenen op de gevoeligheid eener balans. Wij hebben reeds gezien, dat het steeds onder het steunpunt moet gelegen zijn; maar het laat zich gemakkelijk aantoonen, dat, hoe digter het daarbij ligt, des te gevoeliger de weegschaal zijn zal. Zij AB (Fig. 40) de evenaar, C het steunpunt, G het zwaartepunt, dan zal, als in B een overwigtje p geplaatst wordt, de evenaar een schuinen stand aannemen, en, daar het zwaartepunt zich dan niet meer vertikaal onder C, maar in G′ bevindt, zal het gewigt van den evenaar, dat wij door W voorstellen, dan op een hefboomsarm G′D werken. In den toestand van evenwigt zal dus $W \times G'D = p \times CE$ moeten zijn. Hoe kleiner dus G′D is, des te kleiner zal ook p wezen. Ligt het zwaartepunt hooger, bijv. in H, dan zal de hefboomsarm, waarop het gewigt van den evenaar in den schuinen stand werkt, veel kleiner zijn; een geringer overwigtje zal dus een even grooten doorslag geven, en de balans zal dus gevoeliger zijn. (1)

Fig. 41.



(1) Wij hebben achtervolgens de vereischten nagegaan voor de bruikbaarheid en gevoeligheid eener balans. Eenvoudiger, doch met behulp van eene trigonometrische formule, kan zulks op de volgende wijze geschieden. Zijn in fig. 41 A en B de ophangpunten, in elk van welke een gewigt P werkt, C het midden, O het steunpunt, G het zwaartepunt, en stelle men $AC = BC = a$, $OC = b$, $OG = c$. Stellen wij voorts, dat door een in B aangebragt overwigtje p de evenaar den stand A′B′ aanneemt; het steunpunt is natuurlijk

De weegschalen, waarvan men zich in den handel bedient, behooren aan de opgenoemde voorwaarden te voldoen, althans aan die, wier afwezigheid den toestel onbruikbaar of onnaauwkeurig zoude maken. Het spreekt echter van zelf, dat aan hare bewerking niet die zorg kan besteed worden, die voor kostbare werktuigen, voornamelijk voor natuur- en scheikundig gebruik, een vereischte is. Fig. 42 stelt zoodanige voor wetenschappelijk gebruik bestemde balans voor, die, om ze van de beweging van de lucht te bevrijden, in eene glazen kast besloten is, waarvan het voorste raam een weinig wordt opgeschoven, als men het te wegen voorwerp en de gewigten op de schalen brengen wil. In het midden van den evenaar BB bevindt zich een mes K, gewoonlijk van hard staal vervaardigd, en met eenen zeer fijnen doch niet snijdenden kant op

---

op dezelfde plaats gebleven, het midden C in C', het zwaartepunt G in G' gekomen. Daar de evenaar in dezen stand in evenwigt zijn moet, zoo zullen de statische momenten gelijk zijn; wij hebben dus, indien W het gewigt van den evenaar voorstelt, $P \times A'F + W \times G'L = (P+p) DF$.

Noemt men nu den doorslag α, dan is $A'F = A'E + HO = a \cos. \alpha + b \sin. \alpha$, $DF = DE - HO = a \cos. \alpha, - b \sin. \alpha$, $G'L = c \sin. \alpha$; wordt dit gesubstitueerd, dan vindt men na eenige herleiding,

$$\text{tang. } \alpha = \frac{ap}{(2P+p)\, b + Wc}.$$

Nu moeten de afmetingen der balans zoodanig gekozen worden, dat een klein overwigtje een aanzienlijken doorslag geeft; wij moeten dus nagaan, hoe a, b, c, P en W moeten genomen worden, opdat α en dus ook *tang.* α grooter worde. Dit zal verkregen worden:

1° door a grooter te maken. Eene balans met eenen langen evenaar is dus gevoeliger, dan eene met eenen korten.

2° door P kleiner te maken. De gevoeligheid vermindert dus, naarmate de gewigten in de schalen grooter zijn.

3° door W gering te nemen. Hoe ligter dus de evenaar is, des te gevoeliger is de balans.

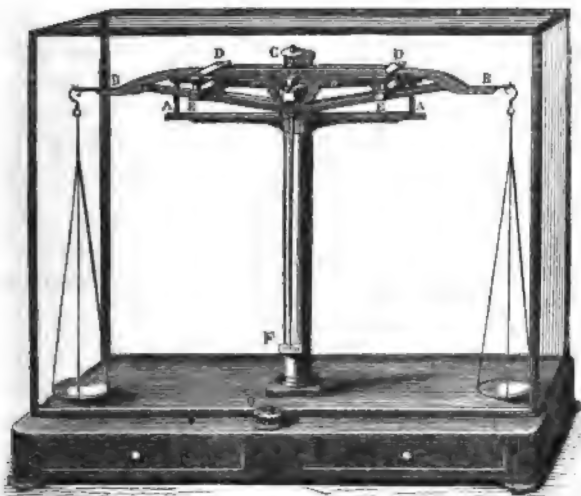
4° door b te verminderen, dat is, door het steunpunt zoo digt mogelijk bij de lijn der ophangpunten te plaatsen.

5° door c kleiner te nemen, dus door het zwaartepunt zeer digt bij het steunpunt te plaatsen.

Het gevoeligst maakt men de balans, door $b = 0$ te maken, dat is, door te zorgen, dat steunpunt en ophangpunten in ééne regte lijn liggen. Alsdan is $\text{tang. } \alpha = \frac{ap}{cW}$. In dit geval oefenen de op de schalen geplaatste gewigten P geen invloed op de gevoeligheid uit. Hoe kleiner c is, des te grooter zal de doorslag α zijn; c mag echter niet $= 0$ genomen worden, want dan werd tang $\alpha = \infty$, en dus $\alpha = 90°$. De evenaar zoude dan bij het geringste overwigt vertikaal gaan staan. Bovendien zoude dan, als er geen overwigt in de schaal was, $\text{tang. } \alpha = \frac{0}{0}$ zijn, en de evenaar dus in elken stand in evenwigt zijn; daarentegen, als c niet gelijk 0 genomen wordt, zal bij gelijkheid der gewigten tang. $\alpha = 0$ worden; de evenaar moet dan eenen horizontalen stand aannemen. Het zwaartepunt mag dus niet in het steunpunt liggen, wanneer dit juist tusschen de ophangpunten gelegen is. Dat het niet boven het steunpunt mag liggen, blijkt daaruit, dat, als men c negatief neemt, ook *tang.* α negatief wordt, en dus α grooter dan 90°. De evenaar zoude dan omslaan.

een horizontaal vlakje rustende, dat óf van staal óf van achaat vervaardigd is. Daar het van belang is, dat de beide armen even lang blijven, zoo moet ook de ophanging der schalen zoodanig geschieden, dat het gewigt altijd in hetzelfde punt blijft werken. Dit wordt verkregen, door ook daar zoodanige mesjes te plaatsen, doch met den scherpen kant naar boven, en de haakjes van de schalen van binnen met achaten of stalen vlakjes te voorzien. Door deze inrigting wordt tevens de tegenstand, dien de evenaar in zijne beweging zoude kunnen ondervinden, zeer verminderd. Soms is de evenaar massief, doch veelal, zoo als in onze afbeelding, zamengesteld uit verschillende staven. In het laatste geval is hij ligter, en wordt dus de gevoeligheid bevorderd, zonder dat de kans om door te buigen grooter wordt. Wanneer toch de evenaar doorbuigt, zal de weging minder naauwkeurig zijn, daar in dat geval het steunpunt boven de lijn, die de ophangpunten vereenigt, komt te liggen. In C bevindt zich een knopje, dat hooger of lager kan geschroefd worden; daardoor zal het zwaartepunt van den evenaar verplaatst, en dus de gevoeligheid van de balans vermeerderd kunnen worden. Onder aan den evenaar is bovendien een lange wijzer aangebragt, wiens punt op een verdeeld boogje F wijst. Daaraan zal men kunnen zien, of de evenaar al of niet horizontaal staat.

Fig. 42.



Ten einde de slijting van het mes K op het achaten vlakje te voorkomen, is het van belang, wanneer men de balans niet gebruikt, den evenaar in rust te kunnen zetten, en zelfs de aanraking van het mes met het vlakje te doen

ophouden. Te dien einde zijn aan den evenaar twee dwarsstukken D vastgemaakt. In de kolom CF bevindt zich eene vertikale staaf, die door middel van het knopje O kan opgeligt worden, en die aan haar bovenste uiteinde eene dwarsstaaf *aa* heeft, aan welke zich wederom twee dwarsstukken E bevinden. Wordt nu de staaf *aa* opgeligt, dan komen de stukken E tegen D aan, de geheele evenaar wordt opgeligt, en rust op de stukken E. AA zijn kleine pennetjes, die dienen om het stuk *aa* in zijne op- en neêrgaande beweging te rigten. Deze inrigting is die, welke Deleuil te Parijs aan zijne voortreffelijke balansen geeft, welke gezegd worden bij eene belasting van 1 pond voor een overwigtje van een milligramme een merkbaren doorslag te geven. De gevoeligheid zoude dus één millioenste bedragen. Bij sommige balansen, door den nederlandschen instrumentmaker Becker vervaardigd, is het achaten vlakje beweegbaar. Wordt dit naar beneden gelaten, dan gaat de evenaar mede, tot dat hij onder weg op een vast stuk rusten blijft, terwijl het vlakje verder naar beneden gaat. Zijne balansen, voor scheikundig gebruik zeer geschikt, geven bij eene belasting van 1 ons een doorslag bij een overwigt van $^1/_5$ milligramme. Hij heeft er echter nog gevoeliger vervaardigd. Bij deze, even als bij die van Oertling te Weenen, is de eene arm van den evenaar verdeeld in 100 deelen. Hangt men daaraan een gewigtje van 1 centigramme, dan zal eene verplaatsing van dat gewigtje, ter waarde van eene verdeeling, dezelfde uitwerking hebben, alsof men $^1/_{10}$ van een milligramme in de schaal bijvoegt. Bij zoodanige uiterst gevoelige balansen zal de evenaar niet terstond den horizontalen stand aannemen, maar een geruimen tijd schommelingen volbrengen, alvorens tot rust te komen. Het is evenwel niet noodig, het einde dier schommelingen af te wachten; men behoeft zich slechts te overtuigen, dat de afwijkingen van den wijzer ter regter- en linkerzijde van het nulpunt bij F even groot zijn. Te dien einde zijn dan ook daar verdeelingen aangebragt.

Met eene balans, die ongevoelig en traag is, zal men nimmer naauwkeurige wegingen kunnen doen. Dit zal echter wel kunnen geschieden met eene balans met ongelijke armen, mits zij slechts gevoelig zij. Men kan dan op de volgende wijze te werk gaan, welke men aan de Borda verschuldigd is, en die naar hem genoemd wordt. Men legt het te wegen voorwerp op de eene schaal en op de andere hagelkorrels, zand of dergelijke, totdat er evenwigt is. Vervolgens neemt men het voorwerp weg, en vervangt het door naauwkeurige gewigten, totdat er weder evenwigt is; die gewigten zullen dan juist het gewigt van het ligchaam aanwijzen, omdat beide achtervolgens op denzelfden hefboomsarm gewerkt hebben.

Men zal tot een gelijk resultaat komen, door eerst het voorwerp op de eene schaal te leggen, en na te gaan hoeveel in de andere schaal moet gelegd

worden om evenwigt te maken; en vervolgens het voorwerp op de andere schaal te plaatsen, en andermaal evenwigt te maken. Het ware gewigt van het ligchaam is dan de middenevenredige van de twee gevondene. Zijn bijv. a en b de beide armen, P en Q de uitkomsten dier twee wegingen, en X het ware gewigt, dan is $aX = bP$, $bX = aQ$, waaruit men door vermenigvuldiging, vereenvoudiging en worteltrekking vindt $X = \sqrt{PQ}$. Als P en Q slechts weinig van elkander verschillen, kan men zonder merkbare fout $\frac{1}{2}(P + Q)$ nemen.

44. **Wetten bij den vrijen val van zware ligchamen.** — Wanneer men een steentje en eene veêr te gelijk van zekere hoogte laat vallen, dan zal het steentje lang voor de veêr op den grond aangekomen zijn. De steen valt dus veel schielijker dan de veêr; de oorzaak hiervan is echter niet gelegen in eene verschillende werking der zwaartekracht, maar alleen in den tegenstand van de lucht. Men kan zich hiervan overtuigen door de proef in het luchtledige te doen. Te dien einde wordt uit eene lange glazen buis door middel van de zoogenaamde luchtpomp, die wij eerst later zullen leeren kennen, de lucht verwijderd; laat men nu daarin te gelijk een steentje en een veêrtje vallen, dan zal men zien, dat zij gelijktijdig op den bodem komen. Het is dus van belang bij de verschijnselen van vallende ligchamen rekenschap te houden van den wederstand, dien de lucht er op uitoefent. De volgende wetten hebben betrekking op den vrijen val in het luchtledige.

Daar de zwaartekracht gedurende den geheelen tijd, dat een ligchaam valt, op dezelfde wijze blijft werken, zal ook de snelheid in gelijke tijden eene gelijke vermeerdering moeten ondergaan. Wanneer een vrij vallend ligchaam, na gedurende eene seconde gevallen te zijn, eene snelheid g heeft verkregen, dan zal die snelheid na verloop van elke seconde met eene gelijke hoeveelheid vermeerderen; de snelheid na 1, 2, 3, 4, ... t seconden wordt dus uitgedrukt door g, $2g$, $3g$, $4g$, ... tg. *De snelheden zijn dus evenredig aan de tijden, welke sedert het begin van den val verloopen zijn.* Is v de snelheid, die het ligchaam na t seconden verkrijgt, g die na de eerste seconde, dan is

$$v = gt. \tag{1}$$

De beweging van een vrij vallend ligchaam is dus blijkens de vroeger (36) gegevene bepaling eene *eenparig versnelde beweging.*

Om den weg te bepalen, in de eerste seconde doorloopen, merke men op, dat de snelheid bij het begin 0 was, en bij het einde g, en dat dus, daar de beweging *eenparig versneld* was, de doorloopene ruimte even groot moet zijn, als wanneer het zich eenparig had bewogen met eene snelheid, die het gemiddelde van 0 en g, dus $\frac{1}{2}g$, was. De weg, in de eerste seconde afgelegd,

is dus $\frac{1}{2}g$, of de helft van de snelheid bij het einde dier seconde. Bij het einde der 2e seconde is de snelheid $2g$; de gemiddelde snelheid gedurende de twee eerste seconden is dus g of $2 \times \frac{g}{2}$, en de doorloopene ruimte gedurende dien tijd $2 \times 2 . \frac{g}{2}$. Bij het einde der 3e seconde is de snelheid $3g$; de gemiddelde snelheid gedurende de drie eerste seconden is dus $\frac{3g}{2}$, zoodat de gedurende dien tijd afgelegde weg bedraagt $3 \times 3 . \frac{g}{2}$. In het algemeen zal volgens de zoo even aangetoonde wet de snelheid na verloop van t seconden zijn gt; de gemiddelde snelheid gedurende dien tijd was dus $\frac{1}{2}gt$, en de weg gedurende den tijd t afgelegd, wordt dus uitgedrukt door het product $\frac{1}{2}gt \times t$. Noemt men dien weg h, dan is

$$h = \tfrac{1}{2}gt^2, \tag{2}$$

welke formule de wet uitdrukt, dat *de doorloopene wegen of valhoogten evenredig zijn aan de tweede magten der tijden*, als ook, *dat de ruimte, in de eerste seconde afgelegd, de helft is der snelheid bij het einde dier seconde.*

De wegen in 1, 2, 3, 4, ... seconden afgelegd zijn dus $\frac{1}{2}g$, $4 \times \frac{1}{2}g$, $9 \times \frac{1}{2}g$, $16 \times \frac{1}{2}g$, ... Door aftrekking vindt men terstond hieruit, dat de ruimten, achtervolgens in elke seconde doorloopen, zich verhouden als de reeks der onevene getallen 1, 3, 5, 7, enz. In de t^e seconde wordt dus eene ruimte $(2t-1)\frac{1}{2}g$ afgelegd. Daar in elke seconde eene ruimte g meer doorloopen wordt, dan in de voorgaande, geeft men aan de grootheid g dikwijls den naam van *versnelling*.

Wordt tusschen de formulen (1) en (2) t geëlimineerd, dan vindt men

$$h = \frac{v^2}{2g}, \quad v = \sqrt{2gh}; \tag{3}$$

de valhoogten zijn dus evenredig aan de vierkanten der eindsnelheden. De formule $v = \sqrt{2gh}$ dient om de eindsnelheid te berekenen, als de valhoogte bekend is, en men de waarde van g kent. Wat deze laatste aangaat, men zoude die kunnen bepalen, door de ruimte te meten, die een vrijvallend ligchaam gedurende eene seconde doorloopt, en die, zooals wij zagen, door $\frac{1}{2}g$ wordt voorgesteld; wij zullen later echter betere en naauwkeurigere middelen leeren kennen om die waarde te vinden, en bepalen ons dus voorloopig met de opgave, dat $g = 9.813$ ellen is, en dat een geheel vrij vallend ligchaam dus in de eerste seconde eenen weg van 4.906 ellen zoude afleggen.

In werkelijkheid geschiedt dit echter niet; de oorzaak van deze afwijking

is de tegenstand, dien het ligchaam van de lucht ondervindt. Deze tegenstand zal geene eenparige vertraging veroorzaken, maar eene zooveel te grootere, naarmate de snelheid aanzienlijker wordt. Hoewel zijne wetten nog onvolledig bekend zijn, neemt men veelal aan, dat, wanneer de snelheid aanzienlijk is, de wederstand evenredig is aan de tweede magt der snelheden. Het gevolg daarvan is, dat er een tijd zal zijn, dat de versnelling van een ligchaam, dat door zijn gewigt valt, uiterst gering zal zijn, en dat de beweging dus nagenoeg in eene eenparige overgaat. Wij zien hiervan gedurig voorbeelden bij voorwerpen, die, hoewel van eene groote hoogte vallende, toch niet die snelheid hebben, welke zij ten gevolge van die valhoogte zouden moeten hebben; het meest in het oog loopend is zulks bij de regendruppels en hagelkorrels, die, indien zij wezenlijk op den grond aankwamen met de snelheid, die men uit de formule $v = \sqrt{2gh}$ zoude afleiden, veel aanzienlijker verwoestingen zouden te weeg brengen.

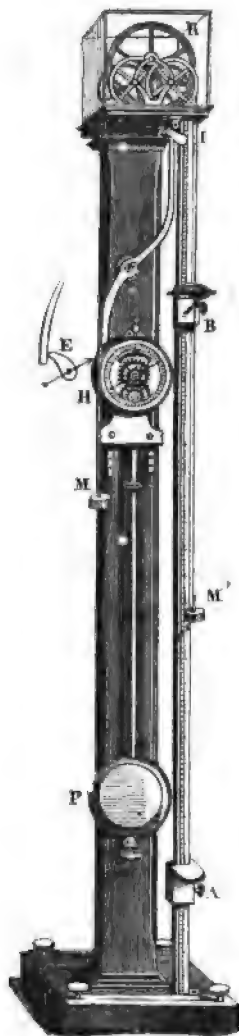
45. **Hellend vlak van Galilei.** — De hier vermelde wetten is men verschuldigd aan Galilei (1602), die ze proefondervindelijk aantoonde, door ligchamen te laten vallen langs een hellend vlak. Zooals wij reeds hebben opgemerkt (32), zal, als een ligchaam zich op eene helling bevindt, niet het geheele gewigt oorzaak der beweging zijn, maar slechts de ontbondene, evenwijdig met de helling. Daar de kracht dan veel geringer is, zal ook de beweging des te langzamer wezen; aan den *aard* der kracht evenwel, van welken alleen de wetten afhankelijk zijn, wordt niets veranderd. Laat men dus langs eene helling ligt beweegbare ligchamen afglijden, dan zal men uit de onderlinge vergelijking der in 1, 2, 3,... seconden doorloopene wegen de boven vermelde wetten kunnen afleiden.

46. **Toestel van Atwood.** — Beter dan het hellend vlak van Galilei is tot proefondervindelijke aantooning der wetten bij den vrijen val het werktuig van Atwood (1781) geschikt, dat in fig. 43 is afgebeeld.

Dit werktuig bestaat voornamelijk uit eene ruim twee ellen hooge houten kolom, waarboven zich een rad of katrol R bevindt, die zeer ligt draaijen kan, en waarover eene zijden koord is geslagen, aan wier beide uiteinden zich gewigten M en M′ bevinden. Op zijde, juist daar waar het gewigt M′ zich op en neêr beweegt, is eene in palmen en duimen verdeelde vertikale schaal, waaraan zich twee verschuifbare klossen A en B bevinden, die door middel van schroefjes kunnen vastgeklemd worden. De onderste klos A is voorzien met een horizontaal vlakje, dat het gewigt M′ tegenhoudt, als het zich naar beneden beweegt; de bovenste daarentegen heeft een ring, groot genoeg om

dat gewigt door te laten. Aan de kolom is voorts een uurwerk H verbonden, dat, door een slinger P geregeld, de seconden op eene hoorbare wijze aangeeft. Te gelijk met den wijzer, die op de wijzerplaat de seconden aanwijst, beweegt zich daarachter een stuk E (in de afbeelding afzonderlijk voorgesteld), dat tegen een hefboom D aandrukkende, op een bepaald oogenblik een plaatje I doet vallen, waarop het gewigt M' geplaatst was. Om eindelijk de beweging van het rad R zoo min mogelijk te belemmeren, laat men de stalen as rusten op andere raderen op eene wijze, die uit de figuur voldoende blijkt.

Fig. 43.



Wanneer de gewigten M en M' gelijk zijn, zullen zij, door een stoot in beweging gebragt, eene eenparige beweging aannemen. Wordt echter op M' een overwigtje geplaatst, dan zal dit gewigt daardoor naar beneden gaan, en M doen stijgen. De beweging van M' moet, wat den aard aangaat, dan weder geheel overeenkomen met die van een vrij vallend ligchaam, maar zij zal langzamer wegen. Wij kunnen ons gemakkelijk hiervan rekenschap geven. Stellen wij, dat aan de beide uiteinden van het touw gelijke gewigten geplaatst zijn, en bovendien bij M' een overwigtje m, dat nu oorzaak is van de versnelde beweging, en na eene seconde aan het geheele zamenstel van gewigten $2M + m$ eene snelheid mededeelt, die wij g' zullen noemen, dan zullen wij voor de hoeveelheid beweging (38), door dat overwigtje veroorzaakt, hebben $(2M + m)\,g'$. Was het overwigtje m daarentegen alleen en vrij gevallen, dan had het na eene seconde eene snelheid g verkregen, en de hoeveelheid beweging zoude dan mg zijn. Daar echter dezelfde kracht, namelijk het gewigt van het overwigtje m, in beide gevallen oorzaak van de beweging is, zoo moet ook de voortgebragte hoeveelheid beweging even groot zijn; men heeft dus $(2M + m)\,g' = mg$, waaruit men

terstond vindt $g' = \frac{mg}{2M + m}$. Heeft men bijv. twee gewigten van 50 wigtjes en een overwigtje van 5 wigtjes, dan zal $g' = \frac{g}{21}$ zijn; de snelheid na de eerste seconde zal dus 21 maal geringer zijn, dan wanneer een ligchaam geheel vrij valt. Ook de doorloopene ruimten zullen dan, blijkens de formule (2), in dezelfde verhouding kleiner worden.

Om nu door middel van den toestel van Atwood de bevestiging der wetten bij den vrijen val te vinden, plaatse men het gewigt M′, voorzien van een overwigtje, bij I, het nulpunt der schaal. Dit overwigtje heeft zoodanigen vorm, dat het, als het gewigt door den ring B gaat, daarop blijft liggen. In fig. 43 bevindt het zich op den ring, terwijl het gewigt M′ reeds verder naar beneden is gevallen. Na eenige pogingen zal men gemakkelijk den ring B zoo kunnen plaatsen, dat het gewigt M′ daardoor heengaat, juist ééne seconde nadat het I verlaten heeft. De in die seconde afgelegde weg wordt dan door de cijfers op de schaal aangewezen. Stellen wij, dat deze 15 duim bedraagt. Daar het overwigtje nu op den ring blijft liggen, houdt de eigenlijke oorzaak der beweging, de werking der zwaartekracht, op, en het gewigt M′ zal alleen blijven naar beneden gaan tengevolge van de snelheid, die het verkregen had op het oogenblik dat het door den ring ging, en die nu geene vermeerdering meer ondergaan kan. Heeft men de schuif A 30 duimen beneden B, dus op 45 duim, geplaatst, dan zal men bemerken, dat het ligchaam daar juist bij het einde der tweede seconde aankomt. Hieruit blijkt dus reeds, dat de in de eerste seconde doorloopene ruimte de helft is van de snelheid na de eerste seconde. Plaatst men nu den ring op 60 duim, en de schuif A op 120, dan zal men bevinden, dat het gewigt door den ring gaat, twee seconden na zijn vertrek van I, en bij het einde der 3e seconde bij A aankomt. Wordt de ring op 135 en A 90 duim lager, dus op 225, geplaatst, dan zal het gewigt na 3 seconden door den ring gaan, waar het overwigtje liggen blijft, terwijl het in de 4e seconde den weg 90 aflegt, die dus de snelheid na drie seconden, of de *eindsnelheid* der derde seconde aanduidt. Uit deze proeven blijkt dan, dat de eindsnelheden zich verhouden als de tijden, en de doorloopene wegen als de tweede magten der tijden; hierdoor wordt tevens bevestigd, dat de zwaartekracht, gestadig op een ligchaam werkende, daaraan eene eenparig versnelde beweging mededeelt.

Met behulp van den toestel van Atwood kan men ook de juistheid aantoonen van de eigenschap, die wij zoo even hebben afgeleid van het begrip van hoeveelheid beweging, dat namelijk de snelheid geringer is, naarmate de massa,

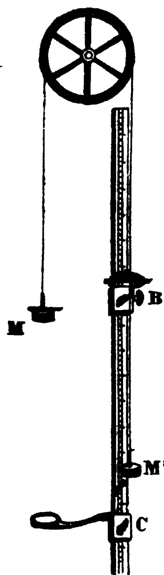
die door eene zelfde kracht in beweging gebragt wordt, grooter is, of wat op hetzelfde neerkomt, dat de snelheden evenredig zijn aan de krachten, waardoor zij aan eene zelfde massa na eenen bepaalden tijd medegedeeld worden. Wanneer bijv. M en M' elk 240 wigtjes bedragen, en bij M' een overwigt van 20 gevoegd wordt, dan zal de geheele massa, die dan 500 wigtjes bedraagt, door 20 wigtjes worden in beweging gebragt. Men ga dan na welke de snelheid na ééne seconde is. Vervolgens make men de gewigten elk van 245 wigtjes, en voege bij M' een overwigtje van 10 wigtjes, dan zal het totale gewigt weder 500 bedragen, doch nu door eene kracht van 10 wigtjes worden in beweging gebragt. Men zal bevinden, dat de snelheid na de eerste seconde alsdan slechts de helft bedraagt van die in het eerste geval.

47. **Eenparig vertraagde beweging.** — Wordt een ligchaam vertikaal naar boven geworpen, dan zal het stijgen, maar met steeds afnemende snelheid, tot dat het, tot een zeker punt gekomen, weder begint te vallen. Ook de wetten van deze beweging, die dus eene vertraagde zal zijn, laten zich gemakkelijk bepalen.

Stellen wij dat het ligchaam met eene snelheid u opwaarts geworpen wordt, dan zoude het die snelheid behouden, zoo de zwaartekracht hare werking niet uitoefende. Deze echter geeft het ligchaam na verloop van een tijd t eene snelheid gt, welke benedenwaarts gerigt zijnde van u moet worden afgetrokken, zoodat de snelheid van het opgeworpen ligchaam na t seconden zal zijn $u - gt$. Na verloop van zekeren tijd zal de snelheid nul gevonden zijn; alsdan is dus $u - gt = 0$, $u = gt$ en $t = \frac{u}{g}$, welke formule den tijd uitdrukt, dien het ligchaam noodig heeft, om tot zijn hoogste punt te komen. De afgelegde weg wordt gevonden door op te merken, dat het ligchaam tengevolge van de opwaartsche snelheid bij het begin in die t seconden eenen weg ut zoude hebben afgelegd; doch dat, daar de doorloopene ruimte bij den vrijen val $\frac{1}{2}gt^2$ zoude bedragen hebben, de wezenlijk afgelegde weg slechts $ut - \frac{1}{2}gt^2$ moet bedragen. Plaatst men in deze uitdrukking voor u de gevondene waarde gt, dan wordt zij $gt^2 - \frac{1}{2}gt^2$ of $\frac{1}{2}gt^2$. Deze uitkomst doet ons zien, dat de ruimte, die doorloopen wordt door een ligchaam, dat met eene snelheid u opwaarts geworpen wordt, en na eenen tijd t zijn hoogste punt bereikt, juist dezelfde is, die het ligchaam vrij vallende in dienzelfden tijd doorloopen zoude. Daar voorts de eindsnelheid na t seconden wordt uitgedrukt door gt, en ook $u = gt$ gevonden is, zoo blijkt hieruit, dat het ligchaam aan het punt, van waar de opwaartsche beweging begonnen is, terugkomt met eene snelheid, even groot als die, waarmede het opgeworpen werd.

Van de formule (3) $h = \frac{v^2}{2g}$ kan men zich dus ook bedienen, om de hoogte te berekenen, tot welke een ligchaam klimmen zal, dat met eene snelheid v vertikaal naar boven geworpen wordt. Omgekeerd, wil men een ligchaam tot eene hoogte h doen klimmen, dan moet men het eene aanvankelijke (*initiale*) snelheid mededeelen, uitgedrukt door de formule $v = \sqrt{2gh}$, en welke dus even groot is als die, welke het, vrij van eene hoogte h vallende, zoude verkregen hebben. Evenzeer als de beweging van een vrij vallend ligchaam eene eenparig versnelde is, zal dus die van een vertikaal naar boven geworpen ligchaam eene *eenparig vertraagde* zijn.

Fig. 44.

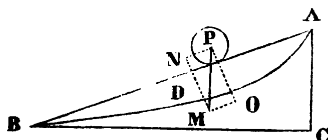


Men kan ook proefondervindelijk door middel van den toestel van Atwood deze wet aantoonen, door namelijk aan de verdeelde schaal eene tweede schuif C (Fig. 44) te maken, even als B van een ring voorzien, doch zoodanig ingerigt, dat het gewigtje M, bij zijne op- en neergaande beweging, er door heen gaat. Men plaatst de schuiven B en C zoodanig, dat op hetzelfde oogenblik dat M een gewigtje opneemt, dat te dien einde op den ring C gelegd is, het gewigt M' zijn overwigtje op den ring B liggen laat. De beide overwigtjes moeten bovendien even groot zijn. Laten wij nu het gewigt M, met het overwigtje voorzien, op eene zekere hoogte los, dan zal dit aan het geheele zamenstel van gewigten eene eenparig versnelde beweging geven. Het gewigt M' komt dus met eene bepaalde opwaarts gerigte snelheid bij B aan. Op hetzelfde oogenblik verliest M zijn overwigtje; M' zoude dus met eene eenparige snelheid verder stijgen, zoo het niet tevens het overwigtje, dat op den ring B ligt, opnam, en daardoor eene eenparig vertraagde beweging verkreeg. Het klimt nu slechts tot een bepaald punt, vanwaar het weder daalt, tot het in B aankomt met eene snelheid, even groot als die welke het had toen het van daar vertrok. Het overwigtje van M' blijft nu weer bij B liggen, terwijl M het zijne terugkrijgt. Dit laatste deelt aan het geheele zamenstel van gewigten weêr eene eenparig vertraagde beweging mede. Men zal zich kunnen overtuigen, dat M weder terugkeert tot hetzelfde punt, vanwaar men het heeft doen vertrekken. Geeft men tevens op de tijden acht, dan zal men bevinden, dat die, welke M' noodig heeft, om van B tot het hoogste punt te komen, en die, welke vereischt wordt om het weder tot B terug te te doen vallen, volkomen even groot zijn.

Men zal ligt inzien, dat de afwisselend op- en neêrgaande beweging der gewigten steeds zoude moeten voortduren, zoo de tegenstand van de lucht en de hindernissen, die de deelen van den toestel in hunne beweging ondervinden, er geen vertragenden invloed op uitoefenden. Het is dan ook aan den invloed van den tegenstand der lucht toe te schrijven, dat een ligchaam, met eene snelheid v vertikaal naar boven geworpen, niet de hoogte $\frac{v^2}{2g}$ kan hereiken, welke door de formule voor de beweging in het luchtledige wordt aangewezen.

48. **Beweging langs een hellend vlak.** — Wanneer een ligchaam zich langs een hellend vlak AB (Fig. 45) beweegt, dan is alleen de ontbondene PN van zijn gewigt PM, welke evenwijdig is aan de helling, oorzaak van de beweging. Deze zal dus in dezelfde verhouding langzamer zijn dan bij den vrijen val, als AC kleiner is dan AB. Stellen wij de hoogte AC en de lengte AB van het hellend vlak voor door h en l, dan zal een ligchaam, dat langs de helling afglijdt, na eene seconde eene snelheid $g' = \frac{h}{l} g$ hebben. De eindsnelheid, nadat het van A tot B geloopen is, zal dus worden uitgedrukt door $\sqrt{2g'l} = \sqrt{2g.\frac{h}{l} \times l} = \sqrt{2gh}$, welke juist de eindsnelheid is van een ligchaam, dat vertikaal van A tot C is gevallen. Hieruit volgt de wet, dat een ligchaam, langs eene helling nederdalende, in eenig punt van die helling eene snelheid heeft, welke juist gelijk is aan die, welke het, vrij vallende, zoude verkregen hebben in een punt, op dezelfde hoogte gelegen. Het is echter duidelijk, dat het een veel langeren tijd noodig heeft om AB, dan om AC te doorloopen; noemt men den eersten t', den tweeden t, dan is blijkbaar $t' = \frac{l}{h} \times t$.

Fig. 45.



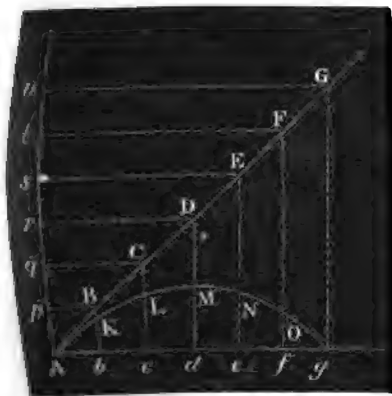
Deze wet, door Galilei aangetoond, is slechts een bijzonder geval van de meer algemeene, volgens welke het onverschillig is, welken weg het ligchaam doorloopen heeft om van A tot B te komen, hetzij die regtlijnig is, hetzij kromlijnig, zoo als ADB. In alle gevallen zal het ligchaam in B aankomen met eene snelheid, behoorende bij de valhoogte AC, en uitgedrukt door $\sqrt{2gh}$. De rigting der snelheid in eenig punt der kromme lijn is die van hare raaklijn in dat punt.

De snelheid $v = \sqrt{2gh}$, die het ligchaam verkregen heeft, als het in B is

aangekomen, zoude, volgens hetgeen hiervan bij de eenparig vertraagde beweging gezegd is, wederom voldoende zijn, om het tot eene hoogte *h* op te voeren. Hetzelfde zal ook hier inderdaad het geval zijn, wanneer de beweging niet vertikaal naar boven, maar tegen eene helling op geschiedt. De zwaartekracht zal ook hier vertragend werken, doch in mindere mate, dan bij de beweging vertikaal naar boven, even als zij bij de benedenwaartsche beweging langs het hellend vlak in geringere mate werkte, dan bij den vrijen val. Men mag dus zeggen, dat een ligchaam, dat zich langs een hellend vlak of langs eene kromme lijn bewogen heeft, onderaan eene snelheid verkregen heeft, die voldoende is, om het langs eene andere helling of langs eene andere kromme lijn naar boven te voeren tot een punt, even hoog gelegen als dat, van waar het vertrokken was. Het spreekt van zelf, dat hierbij wederom de invloed van den tegenstand, dien het ligchaam hetzij van de lucht, hetzij van de beweging langs het vlak kan ondervinden, geheel buiten rekening is gelaten.

49. **Beweging van voortgeworpene ligchamen.** — Wanneer een ligchaam wordt voortgeworpen in eene horizontale rigting, of zoo, dat het met het horizontale vlak eenen scherpen hoek maakt, dan is het onderhevig aan de werking van twee krachten. De eerste, die, waarmede het in eene bepaalde rigting is voortgeworpen, geeft er eene eenparige beweging in die rigting aan, terwijl het van de tweede, de zwaartekracht, eene eenparig versnelde beweging in vertikale rigting ontvangt. Het gevolg kan niet anders dan eene kromlijnige beweging zijn.

Fig. 46.



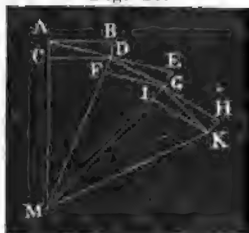
Stellen wij dat een ligchaam van A (Fig. 46) wordt voortgeworpen met eene snelheid AB in eene seconde, dan zoude het, indien de zwaartekracht niet werkte, zich na 1, 2, 3, enz. seconden in de punten B, C, D, enz. moeten bevinden. Deze snelheid kan in twee andere ontbonden worden, eene horizontale en eene vertikale, zoodat A*b*, *bc*, *cd*,.... de horizontale, A*p*, *pq*, *qr*,.... de vertikale snelheden voorstellen. Op eerstgenoemde heeft de zwaartekracht geen invloed, doch wel op de vertikale, die gedurig door hare werking verminderd worden, tot zij nul, en daarna negatief worden, dat is, eene tegenovergestelde rigting verkrijgen. Daar AB, AC,

AD, enz. de wegen voorstellen, die het ligchaam, zonder de werking der zwaartekracht, in 1, 2, 3, enz. seconden zoude afleggen, zoo kan men het ook beschouwen, alsof in horizontale rigting de afgelegde wegen in 1, 2, 3, enz. seconden A*b*, A*c*, A*d*, enz. zijn, in vertikale rigting A*p*, A*q*, A*r*, enz. Stelt BK nu de weg voor, dien een vrij vallend ligchaam in de eerste seconde doorloopen zoude, dan moet A*p* of B*b* daarmede verminderd worden. Het ligchaam zal zich dus na ééne seconde niet in B, maar in K bevinden. Zijne plaats na twee seconden bepaalt men door van C*c* een stuk CL = 4BK af te nemen; na drie seconden, door D*d* te verminderen met een stuk DM = 9BK, enz. Op die wijze zal men eene reeks punten A, K, L, M, enz. vinden, in welke het voortgeworpene ligchaam zich achtervolgens moet bevinden; en de kromme lijn, die ze vereenigt, zal den weg voortstellen, dien het ligchaam doorloopen moet. Deze kromme lijn heeft den naam van *parabool*. Het laat zich gemakkelijk inzien, dat zoowel de initiale snelheid, als hare rigting, eenen grooten invloed op de gedaante dezer parabool moeten uitoefenen. Bij gelijke aanvankelijke snelheid zal het ligchaam het verst voortgeworpen worden, als zulks onder eenen hoek van 45° geschiedt.

Bij deze redeneringen is geene rekenschap gehouden van den tegenstand, dien de lucht op het in beweging zijnde ligchaam uitoefent, en die, zoo als wij reeds hebben opgemerkt, bij eene schielijke beweging veel aanzienlijker zal zijn, dan bij eene langzame. De weg, dien een kogel uit een kanon afgeschoten doorloopt, zal dus aanmerkelijk van eene parabool verschillen.

50. **Beweging om een middenpunt.** — Het buiten rekening laten van den tegenstand der lucht was echter niet de eenige onnaauwkeurigheid, welke wij bij de beschouwing van de loopbaan van een voortgeworpen ligchaam begaan hebben. Wij onderstelden namelijk stilzwijgend, dat de rigting der zwaartekracht in alle punten dier baan dezelfde is, terwijl zij integendeel steeds naar het middenpunt der aarde gerigt is. Wij konden echter zonder merkbare fout de evenwijdigheid dier rigtingen aannemen, omdat de doorloopene weg zeer klein was in vergelijking van den afstand tot het middenpunt der aarde. Anders zal het daarmede gesteld zijn, wanneer die weg niet zoo klein is in betrekking tot den afstand van het punt, vanwaar de aantrekking uitgaat, zoo als bijv. het geval is bij de beweging van de aarde en de andere planeten om de zon, en bij die van de maan om de aarde. Stellen wij dat een ligchaam A (Fig 47), waarop een ander ligchaam M eene aantrekking uitoefent, bij het begin een stoot heeft gekregen, die het in de rigting AB zoude voeren, dan

Fig. 47.



zal het aan deze beide werkingen moeten gehoorzamen. De eerste dezer krachten is eene oogenblikkelijke; zij zoude dus door de inertie het ligchaam steeds dezelfde rigting doen behouden, waardoor het zich meer en meer van M zoude verwijderen, zoo het niet onophoudelijk daarheen werd getrokken door de middenpuntskracht, die gestadig werkt, en, door de verplaatsing van het bewogene ligchaam, steeds van rigting verandert. De gezamenlijke werking dezer krachten kan niet anders dan eene kromlijnige beweging ten gevolge hebben. Stellen wij eenvoudigheidshalve, dat de middenpuntskracht in M niet onophoudelijk, maar met tusschenpozingen werkt, dan zal in het eerste klein tijdsdeeltje het ligchaam de rigting AD moeten volgen van de diagonaal van het parallelogram, waarvan AB en AC, de snelheden, die het ten gevolge van den oogenblikkelijken stoot en van de middenpuntskracht verkrijgen zoude, de zijden zijn. In D gekomen, zoude het in dezelfde rigting DE voortgaan; nu tracht echter de middenpuntskracht het van D naar F te brengen, en het volgt dus weder den weg DG; op gelijke wijze zal het niet in H, maar in K aankomen. Men zal ligt inzien dat de lijn ADGK eene kromme lijn wordt, zoodra men aanneemt, dat de aantrekkingskracht niet bij tusschenpozingen, maar onophoudelijk werkt, terwijl het ligchaam steeds tracht zich in de rigting der raaklijn voort te bewegen. Men noemt de kracht, waarmede het inderdaad zich in die rigting zoude voortbewegen, zoo de middenpuntskracht ophield te werken, *tangentiaalkracht.*

De vorm der kromme lijn hangt af van de betrekkelijke rigting en grootte der beide krachten, die op het ligchaam werken. Men kan zich hiervan proefondervindelijk overtuigen, door een bal aan een langen draad op te hangen, en aan dezen, na hem uit den evenwigtstoestand gebragt te hebben, een zijdelingschen stoot te geven. De bal tracht, tengevolge van de zwaartekracht, zich weder te bewegen naar het punt, waarin hij zich in den toestand van rust bevond, en het is dus juist, alsof hij door dat punt aangetrokken werd; de stoot, dien men er met de hand aan geeft, is de oogenblikkelijk werkende kracht. Men zal bevinden, dat de vorm der lijn, die de bal beschrijft, afhangt zoowel van de meerdere of mindere hevigheid van den stoot, als van den afstand van het middenpunt.

De aantrekkingskracht, die oorzaak is van de beweging der hemelligchamen, werkt in de regte reden der massa's, en in de omgekeerde reden van de tweede magten der afstanden. Newton (1666) heeft het eerst deze wet ontdekt, waardoor de algemeene aantrekkingskracht aan dezelfde wetten onderworpen werd, als de zwaartekracht, waarvan men de werkingen op de oppervlakte der aarde waarneemt; hij begreep, dat dezelfde kracht, die een steen op den grond doet vallen, ook de maan om de aarde doet bewegen. Men noemt ze

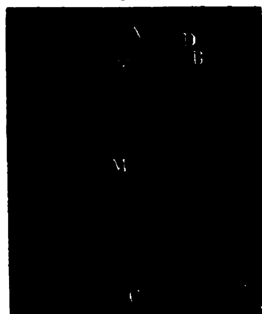
daarom gewoonlijk algemeene zwaartekracht of *gravitatie*. Hoewel de stelling van Newton eigenlijk eene hypothese was, zoo zijn toch alle verschijnselen, zoowel bij de hemelligchamen als op de oppervlakte der aarde waargenomen, volkomen met haar in overeenstemming bevonden, zoodat men ze gerust als eene natuurwet mag aannemen. De gravitatie is dus eene eigenschap der stof, wier werking zelfs bij de meest verwijderde stelsels van hemelligchamen waargenomen wordt.

51. **Middenpuntvliedende kracht.** — Wanneer men een steen of een ander zwaar voorwerp aan het eind van een touw vastmaakt, en dan eene schielijke beweging geeft om een vast punt, dan wordt dit touw sterk gespannen. Geraakte het los, dan zoude de steen niet meer zich in een cirkel blijven bewegen, maar terstond in de rigting van de raaklijn zich daarvan verwijderen, zoo als ons uit fig. 47 is gebleken. Eene toepassing hiervan vindt men bij den zoogenaamden slinger, waarmede men steenen tot op eenen grooten afstand kan werpen. Dat er inderdaad eene drukking van uit het middenpunt bestaat, laat zich gemakkelijk door de volgende proeven aantoonen. Over eene ligt beweegbare katrol hangt men eene koord, aan welker uiteinden even zware kogeltjes zijn vastgemaakt, op gelijke wijze als bij den toestel van Atwood. Het spreekt van zelf, dat er evenwigt zal zijn, als deze kogeltjes in rust zijn. Brengt men echter een van hen voorzigtig in eene slingerende beweging, zoodat het kogeltje een cirkelboog beschrijft, dan zal bij elke slingering het andere kogeltje een weinig opgetrokken worden, hetgeen alleen het gevolg kan zijn van eene kracht, werkende in de rigting van de koord, dus van den straal van den beschrevenen cirkel. Heeft men een glas water aan een touw bevestigd, dan zal men het in de rondte kunnen slingeren, zonder dat het water er uitvalt; de drukking van het water tegen den bodem ten gevolge van die omdraaijing moet dus aanzienlijker wezen, dan de werking, die de zwaartekracht er op uitoefent. Die drukking, welke wordt uitgeoefend in de rigting van de straal, van het middenpunt af naar den omtrek, noemt men middenpuntvliedende kracht. Zij wordt echter niet alleen ontwikkeld, wanneer een ligchaam zich beweegt om een vast punt of om eene vaste as, waarmede het verbonden is; zij vertoont zich evenzeer bij elke kromlijnige beweging. Wanneer bijv. iemand op een paard staat, dat schielijk in eenen cirkel rondloopt, dan zal het hem, evenzeer als het paard, onmogelijk zijn, een vertikalen stand aan te nemen. De middenpuntvliedende kracht, die bij die cirkelvormige beweging ontwikkeld wordt, tracht hem van het middenpunt te verwijderen, en zoude hem naar den buitenkant doen vallen, zoo hij niet, door een schuinen stand aan te nemen, maakte, dat de resultante van

zijn gewigt en van de middenpuntvliedende kracht den rug van het paard ontmoette binnen den buitensten omtrek van zijne voeten (41). Het is om dezelfde reden, dat men bij de spoorwegen slechts geringe bogten maakt, en daar, waar men de sterkere bogten niet vermijden kan, de buitenste spoorstaven een weinig hooger legt dan de binnenste.

Brengen wij hetgeen over de middenpuntvliedende kracht gezegd is, in verband met het zoo even (50) aangevoerde over de aantrekking van een middenpunt, dan zal men ligt inzien, dat beide even groot, doch in rigting tegenovergesteld moeten zijn. Immers bij eerstgenoemde doet de tegenstand van de koord, die het ligchaam aan het middenpunt verbindt, dezelfde uitwerking, als in het tweede geval de middenpuntskracht. Dit stelt ons in staat, om de wetten van de middenpuntvliedende kracht te vinden door de beschouwing van een ligchaam, dat door een middenpunt wordt aangetrokken.

Fig. 48.



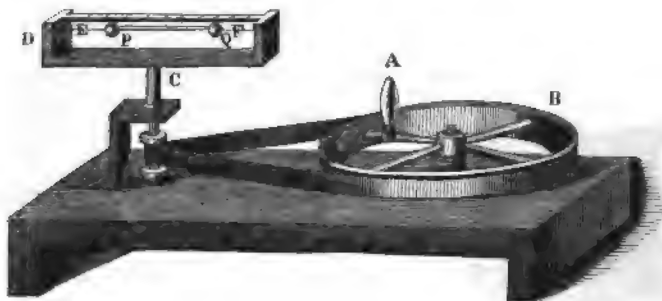
Zij M (Fig. 48) het middenpunt, en de cirkel ABC de weg, dien het ligchaam met eene eenparige snelheid beschrijft. Stellen wij, dat in een zeer klein tijdsdeeltje t het boogje AB doorloopen wordt met eene eenparige snelheid c, dan zal $AB = ct$ moeten zijn. AE zal den weg voorstellen, dien het ligchaam gedurende dien tijd zoude doorloopen hebben, alleen tengevolge van de aantrekkingskracht van M. Daar deze kracht eene gestadig werkende kracht is, zal de beweging langs AE eene eenparig versnelde moeten zijn; wij hebben dus $AE = \frac{1}{2}Ft^2$, als F de snelheid voorstelt, die het ligchaam alleen door de middenpuntskracht na eene seconde hebben zoude. Indien het boogje AB zeer klein genomen wordt, kunnen wij het als een regt lijntje beschouwen, en dus stellen: $AB^2 = AE \times AC$. Hierin de voor AB en AE gevondene uitdrukkingen in de plaats stellende, vindt men, als r den straal AM voorstelt, $c^2t^2 = \frac{1}{2}Ft^2 \times 2r$, of $F = \frac{c^2}{r}$. Daar nu echter in het algemeen eene kracht niet alleen afhankelijk is van de snelheid F na de eerste seconde, maar ook van de massa m van het ligchaam, en kan worden voorgesteld door het product van die twee grootheden (38), zoo vinden wij voor de grootte der kracht $K = \frac{mc^2}{r}$. Hieruit blijkt, dat de middenpuntskrachten, en dus ook de daaraan gelijke middenpuntvliedende krachten, evenredig zijn aan de massa's en aan de tweede magten der snelheden, doch omgekeerd evenredig aan de afstanden van het middenpunt.

6

Noemt men T den tijd, noodig om den geheelen cirkelomtrek $2\pi r$ te doorloopen, dan is $c = \frac{2\pi r}{T}$; de formule wordt dan $K = \frac{4\pi^2 mr}{T^2}$; waaruit blijkt, dat de krachten evenredig zijn met de stralen en omgekeerd evenredig met de vierkanten der omloopstijden.

Deze wetten kunnen proefondervindelijk aangetoond worden. Men gebruikt daartoe in de eerste plaats een toestel, waardoor men aan eene as eene schielijke draaijende beweging kan geven. Fig. 49 stelt er zoodanig een

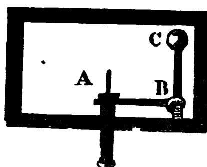
Fig. 49.



in zijn eenvoudigsten vorm voor. Door de kruk A wordt het rad B in beweging gebragt, en deze beweging door een riem zonder eind op eene spil C overgebragt; op de spil plaatst men een houten raam D, waarop verdeelingen zijn aangebragt, terwijl twee zware ballen P en Q, door eene koord onderling verbonden, zich langs een koperdraad EF kunnen heen en weer bewegen. Zijn de twee ballen even groot, en beide evenzeer van het middenpunt verwijderd, dan zullen in beide door de ronddraaijing even groote middenpuntvliedende krachten ontwikkeld worden, welke, elkander in evenwigt houdende, de ballen in rust doen blijven. Is een der ballen verder van het middenpunt verwijderd, dan zal, daar de omloopstijden gelijk zijn, bij den bal, die het verst van het middenpunt verwijderd is, de grootste kracht ontwikkeld worden; deze trekt dan den anderen bal voort, totdat hij zelf aan den kant van het raam gekomen is; is de andere bal dan reeds voorbij het middenpunt, dan zal hij ook tegen den eersten aankomen. Plaatst men van twee ballen, van welke de een tweemaal zwaarder is dan de andere, den ligtsten tweemaal verder van het middenpunt, dan zal er weder evenwigt zijn, omdat bij gelijke omloopstijden de massa's omgekeerd evenredig moeten zijn aan de afstanden, opdat de ontwikkelde middenpuntvliedende krachten gelijk zullen zijn.

Om aan te toonen, dat de krachten zich verhouden als de tweede magten der snelheden, of wat hetzelfde is, in de omgekeerde reden van de tweede magten der omloopstijden, kan men zich bedienen van den toestel, in fig. 50 voorgesteld, die eveneens op de spil C van den toestel in fig. 49 geplaatst wordt. ABC is een hefboom, wiens armen eenen regten hoek met elkander maken, en die bij B om eene horizontale spil kan draaijen. Aan C bevindt zich een zware bal, die, als de toestel aan het draaijen gebragt wordt, door de middenpuntvliedende kracht tegen den kant van het raam zal aankomen. Daardoor wordt dan tevens het uiteinde van den arm A opgeligt. Men zal nu de omdraaijingssnelheid zoo kunnen regelen, dat een gewigtje op A gelegd juist opgeligt wordt. Legt men er achtervolgens een 4, 9, 16 maal grooter gewigt op, dan zal dit eerst worden opgeligt, door aan den toestel eene 2, 3, 4 maal grootere snelheid te geven.

Fig. 50.



Dat bij grootere massa grootere middenpuntvliedende kracht ontwikkeld wordt, blijkt ook nog uit de volgende proef. AB (Fig. 51) is eene geslotene glazen buis, waarin zich drie vochten van verschillend soortelijk gewigt bevinden, kwikzilver, water en olie. Is de toestel in rust, dan zal het kwikzilver zich onderin bevinden, daarboven het water, en de olie zal boven drijven. Wordt het in beweging gebragt, dan zullen weldra alle vochten zich naar het boveneinde B der buis begeven, en wel in omgekeerde volgorde, zoodat het kwikzilver het verst van A verwijderd is. In de buis AC bevindt zich een looden balletje; is de omdraaijingssnelheid gering, dan blijft het onderin liggen; neemt zij toe, dan klimt het in de buis; de werking der zwaartekracht wordt dan overwonnen door die der middenpuntvliedende kracht, die met de snelheid toeneemt.

Fig. 51.

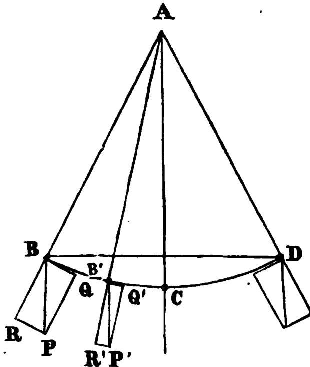


52. **Slinger.** — Elk ligchaam, dat zich bewegen kan om eenig punt of om eene horizontale as, die niet door het zwaartepunt gaat, zal, wanneer het uit zijn evenwigtstoestand gebragt wordt, in eene schommelende beweging geraken. Zoodanig ligchaam, onverschillig welke zijne gedaante is, noemt men een slinger. Ten einde de wetten van deze beweging te leeren kennen, beschouwt men eerst eenen zoogenaamden *enkelvoudigen* slinger, om daaruit de wetten van den *zamengestelden* af te leiden. Elk slingerend ligchaam vormt eenen zamengestelden slinger; door een enkelvoudigen verstaat men een zwaar stoffelijk

punt, opgehangen aan een draad, die volkomen buigzaam en zonder gewigt is. Het is blijkbaar, dat een enkelvoudige slinger niet bestaan kan; men stelt zich dien slechts voor, ten einde daaruit de wetten der slingeringen af te leiden.

Wanneer zulk een slinger uit den toestand van evenwigt AC, (Fig. 52), in den stand AB gebragt wordt, en dan aan de werking van de zwaartekracht wordt overgelaten, dan zal het zware punt B trachten weder den laagsten stand aan te nemen, en zich langs den cirkelboog BC bewegen. Slechts een gedeelte echter van zijne zwaarte doet den slinger deze beweging aannemen; want stelt BP het gewigt voor, dan zal de ontbondene BR de kracht aanwijzen, waarmede de draad gespannen wordt, terwijl BQ oorzaak is van de beweging. Is de slinger in B' gekomen, dan zal B'R' de drukking in de rigting van AB', en B'Q' de beweegkracht voorstellen. De eerste groeit aan en de laatste neemt af, naarmate de slinger tot het laagste punt nadert; in dat punt zal de spanning gelijk zijn aan het gewigt, terwijl de beweegkracht nul is. Aldaar aangekomen heeft het stoffelijk punt echter eene snelheid verkregen, die het in staat stelt zich verder te bewegen; de ontbondene van de zwaartekracht werkt echter nu in eene rigting tegenovergesteld aan die, waarin de beweging plaats heeft; de snelheid zal dus verminderen, totdat de slinger in een punt D komt, dat even hoog als B gelegen is, daar, zoo als wij vroeger (48) gezien hebben, de snelheid in C voldoende is om hem weder even hoog te brengen als het punt, van waar hij vertrokken is. De kracht, die oorzaak is van de beweging, werkt wel onophoudelijk, maar zij is veranderlijk; de beweging van B naar C zal dus wel eene versnelde, en die van C naar D eene vertraagde beweging zijn, maar niet eenparig versneld, noch eenparig vertraagd.

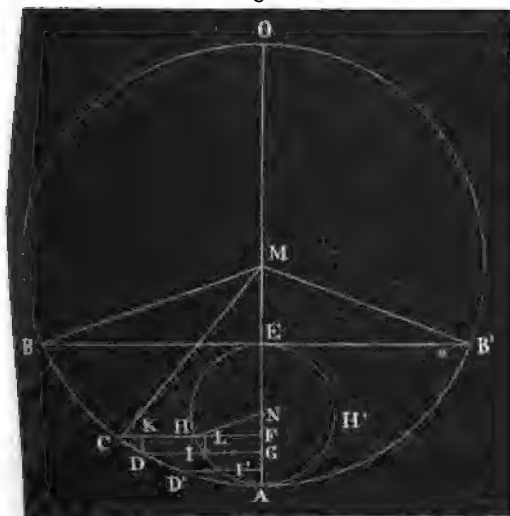
Fig. 52.



Door eene slingering verstaat men de beweging van B naar D of omgekeerd; de tijd eener slingering is dus de tijd noodig om dien weg af te leggen. Uit het voorgaande blijkt, dat die tijd niet op zulk eene eenvoudige wijze kan worden uitgedrukt, als bij de beweging langs eene helling. Voor het geval echter, dat de doorloopene boog BCD, of zooals men het noemt, de *slingerwijdte* zeer gering is, kan de slingertijd door eene eenvoudige formule worden uitgedrukt, die wij zullen trachten uit de bekende wetten van de beweging af te leiden.

Zij M (Fig. 53) het ophangpunt van een slinger, wiens lengte MA $= l$, dan zal hij bij zijne beweging een gedeelte BAB′ van den cirkel beschrijven. Zij verder CD $= s$ een uiterst klein boogje, zeer digt bij A gelegen (in de figuur is het duidelijkheidshalve iets hooger genomen), dan zal de slinger, als hij van B begonnen is zich te bewegen, in C eene zelfde snelheid v hebben, als een ligchaam, dat vrij van E tot F gevallen was; stelt men EF $= b$, dan is dus $v = \sqrt{2gb}$.

Fig. 53.



Daar het boogje CD uiterst klein ondersteld wordt, mag men aannemen, dat het met eene *eenparige* snelheid v doorloopen wordt; de tijd, waarin dit geschiedt, t' stellende, zal $s = vt'$, en dus $t' = \frac{s}{\sqrt{2gb}}$ zijn. Trekken wij nu DG evenwijdig met CF, benevens op EA als middellijn een cirkel, dan wordt van dezen door de lijnen CF en DG een boogje HI afgesneden, dat wij s' zullen noemen. Worden nu nog DK en IL loodregt op CF, benevens de straal HN getrokken, dan geven, daar men CD wel als een regt lijntje mag beschouwen, de gelijkvormige driehoeken CDK en MCF de evenredigheid CD: CM $=$ DK:CF, of $s = \frac{l.\,FG}{CF}$; terwijl uit de gelijkvormige driehoeken HIL en NHF volgt, dat HI : HN $=$ IL : HF, of, als AE $= h$, $s' = \frac{\frac{1}{2}h.FG}{HF}$.

Wij hebben dus $\frac{s}{s'} = \frac{2l}{h} \cdot \frac{HF}{CF}$ Nu is echter $HF^2 = AF \times FE$ en $CF^2 = AF \times FO$, dus $\frac{HF}{CF} = \sqrt{\frac{FE}{FO}}$. Daar echter AF in vergelijking van AO zoo klein gemaakt kan worden, als men maar wil, door CD zoo digt mogelijk bij A te nemen, zal men FO door AO mogen vervangen, zoodat alsdan $\frac{HF}{CF} = \sqrt{\frac{b}{2l}}$ kan genomen worden. Dit in de plaats stellende, is $\frac{s}{s'} = \frac{2l}{h}\sqrt{\frac{b}{2l}} = \frac{\sqrt{2bl}}{h}$. De hieruit afge-

leide waarde van s overbrengende in de formule, boven voor t' gevonden, komt er $t' = \frac{s'}{h} \sqrt{\frac{l}{g}}$. Daar echter voor elk klein boogje van BA deze zelfde formule zal gelden, mits men in plaats van s' het daarmede overeenkomend gedeelte van den halven cirkel AIHE neme, zoo zal de tijd t'', in welken het boogje DD′ doorloopen wordt, worden uitgedrukt door $\frac{s''}{h} \sqrt{\frac{l}{g}}$, zijnde II′ $= s''$. Neemt men de som van al die waarden, dan vindt men voor den tijd t, waarin de geheele boog BAB′ doorloopen wordt, $t = \frac{\text{AHEH}'}{h} \sqrt{\frac{l}{g}}$, of, daar AHEH′ $= \pi h$,

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

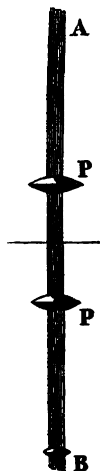
welke formule aanduidt, dat de slingertijden evenredig moeten zijn aan de vierkantswortels uit de lengten, indien namelijk de slingerwijdte slechts gering is; want het is alleen in deze onderstelling, dat de afgeleide formule als genoegzaam naauwkeurig kan beschouwd worden.

In deze formule komt de lengte van den doorloopen boog niet voor; daaruit volgt dus, dat de slingertijden onafhankelijk moeten zijn van de grootte der slingerwijdte, mits deze slechts klein genomen wordt. Daar voorts de massa van het stoffelijk punt evenmin in de voor t gevondene waarde voorkomt, zoo blijkt het, dat het volkomen onverschillig is, hoe zwaar het slingerend voorwerp is. Deze wetten laten zich proefondervindelijk aantoonen; want hoewel een enkelvoudige slinger alleen in onze verbeelding kan bestaan, zoo kunnen wij toch, door een zwaar balletje aan een dunnen draad te hangen, een slinger maken, die weinig er van verschilt. Hangt men zoodanige slingers naast elkander, waarvan de een bestaat uit een looden, een tweede uit een steenen en een derde uit een kurken bal, doch alle van gelijke lengte, dan zal men zich gemakkelijk kunnen overtuigen, dat de massa geen invloed op den duur der slingeringen uitoefent. Geeft men aan een zelfden slinger achtervolgens verschillende slingerwijdte, echter zorg dragende deze niet al te groot te nemen, dan zal men zien, dat hij zijne slingeringen steeds in denzelfden tijd volbrengt, en dat de slingeringen dus *isochroon*, dat is van gelijken duur zijn. Neemt men eindelijk twee slingers, van welke de een viermaal langer is dan de andere, dan zal men bevinden dat de tweede eene slingering volbrengt in de helft van den tijd, dien de eerste daartoe noodig heeft; maakt men den eersten negenmaal langer dan de tweede, dan zullen de slingeringen driemaal langer duren. De wetten van den slinger werden ontdekt door Galilei (1602).

53. **Zamengestelde slinger.** — Wanneer een ligchaam slingert

om een zijner punten of om eene horizontale as, en dus eenen zamengestelden slinger uitmaakt, dan zullen de verschillende deeltjes niet op dezelfde wijze kunnen slingeren, als wanneer zij geheel vrij van elkander waren. Immers de deeltjes, die zich het digtst bij het ophangpunt bevinden, zouden, krachtens de zoo even bewezene wet, in veel korteren tijd eene slingering volbrengen, dan die, welke er verder van verwijderd zijn. Het gevolg hiervan zal wezen, dat de verst afgelegene deeltjes eene vertraging veroorzaken bij die, welke digt bij het ophangpunt gelegen zijn, terwijl omgekeerd deze laatste bewerken, dat de eerste schielijker slingeren, dan zij, geheel vrij zijnde, zouden doen. Het geheele ligchaam geraakt echter in eene bepaalde slingerende beweging, en het laat zich ligt inzien, dat er ergens in hetzelve een punt zal zijn, dat, alleen slingerende, juist in denzelfden tijd eene slingering zoude volbrengen, als nu de geheele massa. Dat punt noemt men daarom het *slingerpunt*, en zijn afstand tot het ophangpunt wordt de lengte van den zamengestelden slinger genoemd; men kan dus ook zeggen, dat de lengte van eenen zamengestelden slinger de lengte is van eenen enkelvoudigen slinger, die zijne slingeringen in denzelfden tijd volbrengt. De voor den laatsten bewezene wetten gelden dus ook voor den eersten, wanneer men in de formule voor l den afstand van het slingerpunt tot het ophangpunt neemt., De eigenschap van het slingerpunt is in 1650 door Chr. Huygens ontdekt

Fig. 54.



De plaats van het slingerpunt zal afhankelijk zijn van den vorm van het slingerend ligchaam, doch is in de meeste gevallen niet dan door zeer ingewikkelde berekeningen te bepalen. Bestaat de slinger uit een zwaren bal, aan eenen dunnen draad opgehangen, dan zal het slingerpunt nagenoeg met het zwaartepunt van den bal zamenvallen; van daar, dat men aan zoodanigen slinger zonder merkbare onnaauwkeurigheid de wetten van den enkelvoudigen slinger toetsen kan.

Door eene eenvoudige proef kan men zich overtuigen, dat bij eenen zamengestelden slinger zwaartepnnt en slingerpunt niet kunnen zamenvallen. Zij AB (Fig. 54) eene staaf, in haar midden een dergelijk mesje hebbende, als dat van den evenaar eener balans, en op gelijke afstanden van dit met gelijke gewigten P voorzien. Het zwaartepunt zal blijkbaar in het midden gelegen zijn; als men dus dezen toestel met het mesje op een horizontaal vlak laat rusten, dan zal hij zich in onverschillig evenwigt bevinden. Brengt men nu onderaan bij B een klein gewigt, dan zal het zwaartepunt zich een weinig naar beneden verplaatsen, en eenen slinger vormen, die, in beweging gebragt zijnde, zijne slingeringen veel langzamer volbrengt,

dan wanneer het gewigt B alleen in het zwaartepunt was opgehangen, en dus eenen enkelvoudigen slinger vormde. De reden hiervan laat zich gemakkelijk inzien. Het gewigt B moet nu de geheele massa in beweging brengen, en zal daaraan dus eene veel geringere snelheid mededeelen, dan wanneer het zich alleen kon bewegen. Wanneer men dit in verband brengt met hetgeen vroeger is opgemerkt aangaande de plaats van het zwaartepunt van den evenaar eener balans, dan zal men terstond inzien, waarom deze zulke langzame schommelingen volbrengt, hoewel het zwaartepunt zoo digt bij het steunpunt gelegen is.

Eene opmerkelijke eigenschap van het slingerpunt mogen wij niet met stilzwijgen voorbijgaan. Wanneer men eenen zamengestelden slinger omkeert, en in zijn slingerpunt ophangt, dan zal hij zijne slingeringen in denzelfden tijd volbrengen, als in den eersten stand. Slingerpunt en ophangpunt kunnen dus verwisseld worden. Men kan van deze eigenschap gebruik maken, om de plaats van het slingerpunt proefondervindelijk te bepalen; men brengt te dien einde een zamengestelden slinger in beweging, en bepaalt den duur eener slingering, door het aantal slingeringen in eenen bepaalden tijd te tellen. Daarna keert men hem om, en laat hem slingeren om eene andere as, die men zoodanig tracht te bepalen, dat de slingeringen juist in denzelfden tijd volbragt worden. Daar in deze as het slingerpunt moet gelegen zijn, is tevens de lengte van den slinger bepaald.

Bij al hetgeen omtrent de beweging van den slinger gezegd is, is van den tegenstand, dien deze van de lucht ondervindt, geene rekenschap gehouden. Het is echter blijkbaar, dat de slingerwijdte daardoor zal afnemen, en dat de slingeringen op het laatst geheel zullen ophouden. Ten einde dezen schadelijken invloed te verminderen, geeft men bij voorkeur aan het slingerend voorwerp eene lensvormige gedaante of althans eene zoodanige, welke het in staat stelt beter de lucht te klieven.

De voornaamste toepassing van den slinger vindt plaats bij de uurwerken. Hoewel reeds vroeger het denkbeeld daarvan bij Galilei schijnt te zijn opgekomen, heeft Huygens (1657) er echter het eerst gebruik van gemaakt, om de beweging bij de uurwerken regelmatiger te maken, terwijl hij in het uurwerk zelf de noodige beweegkracht vond, om den slinger te beletten, na verloop van eenigen tijd, tengevolge van den tegenstand van de lucht of door anderen schadelijken invloed, tot rust te komen.

54. **Gebruik van den slinger tot bepaling van de zwaartekracht.** — Wanneer men uit de formule voor den slingertijd g oplost, dan vindt men $g = \frac{\pi^2 l}{t^2}$. Kent men dus de lengte van eenen slinger, benevens

den tijd, dien hij noodig heeft om eene slingering te volbrengen, dan kan men daaruit de snelheid van een vrijvallend ligchaam na de eerste seconde berekenen, en wel veel naauwkeuriger, dan zij uit de verschijnselen, hetzij bij den vrijen val, hetzij bij den toestel van Atwood, kan worden afgeleid. Deze bepalingen zijn met de grootste zorg in het werk gesteld, eerst door de Borda en Cassini (1790) met een slinger van ongeveer 4 ellen lengte, en naderhand door Biot (1808) met eenen kleineren van slechts 76 duim. Uit beide waarnemingen, zoowel als uit die van Arago en von Humboldt (1818), bleek, dat te Parijs de waarde van g 9.8088 ellen bedraagt.

Deze waarde naauwkeurig bekend zijnde, kan men daaruit de lengte berekenen, die een enkelvoudige slinger zoude moeten hebben, om juist in eene seconde eene slingering te volbrengen; door namelijk $t = 1$ te stellen, vindt men $l = \frac{g}{\pi^2} = 0.9939$ ellen. Huygens heeft reeds de lengte van den secondeslinger als eenheid van lengtemaat voorgesteld. Wij zullen echter zien, dat die lengte niet op alle plaatsen dezelfde zijn kan, en dus het karakter van onveranderlijkheid mist, dat noodig is, om steeds een vasten maatstaf te hebben.

Verschillende opmetingen, sedert 1769 op verschillende plaatsen der aarde in het werk gesteld, hebben doen zien, dat de aarde geen bol is, maar dat zij aan de polen afgeplat is, zooals men het reeds in de 17e eeuw op grond van andere waarnemingen vermoed had. De grootte dier afplatting bedraagt ongeveer $\frac{1}{300}$. De oorzaak van de afgeplatte gedaante der aarde moet gezocht worden in hare wentelende beweging om hare as. Men mag het toch als zeker aannemen, dat de aarde vroeger in een vloeibaren toestand verkeerd heeft; de middenpuntvliedende kracht, door hare omwenteling te weeg gebragt, moest ten gevolge hebben, dat die deeltjes, die het verst van de as verwijderd waren, en bij welke dus de middenpuntvliedende kracht de grootste was, zich meer dan de digter bijgelegene van die as trachtten te verwijderen. Van daar eene uitzetting aan den evenaar en eene afplatting aan de polen. Plaatst men eene weeke bolvormige massa midden op een vlak, dat schielijk wordt in de rondte gedraaid, dan zal men bevinden, dat deze terstond eene dergelijke afgeplatte gedaante aanneemt.

Het onmiddellijk gevolg van de afplatting der aarde is, dat niet alle punten op hare oppervlakte zich op denzelfden afstand van het middenpunt bevinden; en daar de zwaartekracht hare werking uitoefent in de omgekeerde vierkantsreden der afstanden, zoo is het klaarblijkelijk, dat zij aan de polen sterker moet werken, dan onder den evenaar. Er is echter nog eene andere oorzaak, die medewerkt tot vermindering van de werking der zwaartekracht, naarmate men den evenaar nadert. De middenpuntvliedende kracht, door de

dagelijksche beweging der aarde om hare as ontwikkeld, is juist tegengesteld aan de zwaartekracht gerigt; en daar de middenpuntvliedende kracht onder den evenaar de grootste is (51), moet de vermindering der zwaartekracht door haren invloed ook daar aanzienlijker wezen, dan wanneer men zich van den evenaar verwijdert. Beide deze omstandigheden maken dus, dat de werking der zwaartekracht aan de polen sterker is, dan onder den evenaar; en, daar de snelheden evenredig zijn aan de krachten, zal een vrijvallend ligchaam onder den evenaar na éene seconde geringere snelheid hebben, dan onder de pool; of in andere woorden, de waarde van g neemt af, naarmate men den evenaar nadert.

Heeft men dus onder twee verschillende breedtegraden de lengte van den secondeslinger bepaald, dan moeten deze waarden, volgens de formule voor den slinger, evenredig zijn aan de verschillende waarden van g, of $l : l' = g : g'$. Door zoodanige bepalingen op vele plaatsen onder verschillende breedtegraden te doen, heeft men naauwkeurig de gedaante der aarde kunnen bepalen. De grootte der afplatting, uit die waarnemingen afgeleid, komt overeen met die, welke door regtstreeksche metingen en door sterrekundige waarnemingen gevonden is. De volgende tabel bevat de lengte van den secondeslinger, zoo als zij door naauwkeurige waarnemingen voor de aangewezene plaatsen gevonden is, wel te verstaan na aanbrenging der noodzakelijke correctiën.

Plaats.	Geographische breedte.	Lengte van den secondeslinger in ellen.	Waarnemers.
Spitzbergen.	79° 49′ 58″ N.	0.99613	Sabine.
Stockholm.	59 20 43	0.99492	Svanberg.
Königsberg.	54 42 50	0.99441	Bessel.
Londen.	51 31 8	0.99420	Sabine.
Parijs.	48 5 14	0.99394	Biot.
Jamaica.	17 56 7	0.99156	Sabine.
Rawak.	0 1 34 Z.	0.99113	Freycinet.
Ile de France.	20 9 23	0.99185	Duperrey.
Kaap de Goede Hoop.	33 55 15	0.99264	Freycinet.
Kaap Horn.	55 51 20	0.99462	Foster.

Voor Amsterdam moet de lengte van den secondeslinger 0.99430 el bedragen, terwijl de waarde van g daar 9.813 ellen is.

55. **Arbeid, levendige kracht.** — Wij hebben vroeger (38) bevon-

den, dat men, om over de grootte eener kracht te kunnen oordeelen, slechts behoeft na te gaan, welke snelheid zij na eenen bepaalden tijd, bijv. na ééne seconde, aan een ligchaam van eene bepaalde massa kan mededeelen. Men zal echter gemakkelijk inzien, dat dit alleen niet voldoende is, om te weten, welke werking eene zekere kracht heeft uitgeoefend; daartoe is ook noodig, dat men weet, welken weg het aangrijpingspunt dier kracht heeft afgelegd. Immers, wanneer het aangrijpingspunt geene verplaatsing ondergaat, dan kan er geene eigenlijke werking plaats hebben. Een last, die op een horizontaal vlak rust, oefent eene drukking uit, voorgesteld door zijn gewigt; maar zoo lang het aangrijpingspunt niet verplaatst wordt, is er geene werking. Een paard, dat aan eenen te zwaar geladen wagen trekt, zonder dien te kunnen in beweging brengen, doet evenzeer geene nuttige werking. Heeft er daarentegen beweging plaats, dan zal de werking des te aanzienlijker zijn, naarmate de afgelegde weg grooter is. Een paard, dat met eene standvastige kracht van 50 ponden trekt, zal, als het den wagen langs eenen weg van 60 ellen heeft voortgetrokken, driemaal meer werk verrigt hebben, dan wanneer het slechts een weg van 20 ellen heeft afgelegd. Zijn daarentegen de afgelegde wegen even groot, dan zal klaarblijkelijk eene viermaal grootere kracht eene viermaal grootere werking uitgeoefend hebben. Hieruit volgt, dat men de werking, of, zoo als men het zeer eigenaardig noemt, den *arbeid* eener kracht op eene eenvoudige wijze door een getal zal kunnen uitdrukken, indien men slechts eene bepaalde eenheid daarbij aanneemt. Men neemt daarvoor gewoonlijk de werking eener kracht, die noodig is om eene standvastige kracht van één pond langs eenen weg van ééne el te overwinnen, of, wat hetzelfde is, om een gewigt van één kilogramme éénen meter hoog op te ligten. Aan deze arbeidseenheid heeft men daarom den naam van *kilogrammeter* gegeven. De arbeid eener kracht wordt dus uitgedrukt door het produkt van het aantal ponden der kracht met hét aantal ellen van den afgelegden weg. Het paard, dat eene standvastige kracht van 50 ponden langs eenen weg van 60 ellen uitoefende, heeft dus eenen arbeid van 3000 kilogrammeters verrigt. Een man, die een last van 15 pond tot eene hoogte van 200 ellen heeft gebragt, zal eenen arbeid van $15 \times 200 = 3000$ km. verrigt hebben, dus juist evenveel als het paard.

Hoewel het bij de beoordeeling van de hoeveelheid verrigten arbeid eigenlijk niet aankomt op den tijd, waarin die arbeid verrigt werd, zoo is het toch klaarblijkelijk, dat, om denzelfden arbeid in korteren tijd te volbrengen, eene grootere kracht moet aangewend worden. Wanneer men dus den arbeid, dien men met een stoomwerktuig of andere zamengestelde werktuigen in een bepaalden tijd verrigten kan, wil uitdrukken, dan maakt men gebruik van eene andere eenheid; aan den arbeid namelijk die verrigt wordt, wanneer een last van 75

ponden in ééne seconde ééne el hoog opgeligt wordt, heeft men den naam van *paardekracht* gegeven. Eene paardekracht bedraagt dus 75 km. in eene seconde, of 270000 km. in het uur (1).

Zoo wij in het voorgaande het produkt van de kracht met den afgelegden weg arbeid genoemd hebben, dan was dit in de onderstelling, dat de beweging in de rigting der kracht plaats had. Dit zal bijv. het geval wezen, als een last vertikaal naar boven getrokken wordt, als iemand aan eene kruk draait, enz. Dikwijls echter zal het gebeuren, dat de beweging in de rigting der kracht onmogelijk is; men moet dan de kracht ontbinden in twee andere, waarvan de eene dezelfde rigting heeft als de beweging, terwijl de andere loodregt daarop gerigt is. De eerste ontbondene kan alleen hier in aanmerking komen als oorzaak van beweging; en het is deze dus, die met den afgelegden weg moet vermenigvuldigd worden, om den arbeid te vinden. Dezelfde uitkomst zal men evenwel verkrijgen, wanneer men de kracht onveranderd met de projectie van den afgelegden weg op de rigting der kracht vermenigvuldigt. Een voorbeeld zal dit duidelijker maken. Zij (Fig. 45) P een last, die langs eene helling afglijdt. De beweging geschiedt hier volgens AB, terwijl de rigting der kracht vertikaal is. Wordt deze door PM voorgesteld en ontbonden in twee andere PN en PO, dan is de eerste, die evenwijdig is aan de helling, de kracht die eigenlijk de beweging veroorzaakt. Is nu AB de afgelegde weg, dan wordt de arbeid uitgedrukt door AB × PN. Neemt men daarentegen de kracht PM onveranderd, maar in plaats van den weg AB zijne projectie AC op eene vertikale lijn, dan wordt de arbeid door AC × PM voorgesteld. Beide uitdrukkingen hebben, uithoofde van de gelijkvormigheid der driehoeken MNP en ABC, gelijke waarde.

Wil men dus eene zoo algemeen mogelijke bepaling geven van arbeid, dan moet men dien noemen: *het product van eene kracht met de projectie van den door het aangrijpingspunt afgelegden weg op de rigting dier kracht.*

Wij kunnen voor de werking eener kracht nog eene andere uitdrukking vinden, wanneer wij daarbij gebruik maken van hetgeen vroeger (38) is opgemerkt. Toen is namelijk aangetoond, dat eene kracht kan worden voorgesteld door het product MV van de massa van een ligchaam met de snelheid, die zij aan hetzelve na een bepaalden tijd mededeelt, of, zoo als wij het genoemd hebben, door de hoeveelheid beweging. Wanneer een ligchaam, dat aanvankelijk in rust was, na eenen zekeren tijd, bijv. ééne seconde, eene snelheid V heeft gekregen, dan zal, volgens de wetten van de eenparig versnelde beweging, de in die seconde doorloopene ruimte $\frac{1}{2}$V bedragen. Wij

(1) Deze eenheid is aangenomen sedert de proeven, te dien einde door Watt in Engeland gedaan. De gewone kracht van een paard is echter geringer; zij hangt af van de omstandigheden, waaronder men het laat werken, doch mag gemiddeld niet hooger dan 45 km. in de seconde gesteld worden.

kunnen dan de kracht voorstellen door MV, den afgelegden weg door $\frac{1}{2}$V, en vinden dus voor het product $\frac{1}{2}MV^2$, welke uitdrukking dus den arbeid voorstelt, in die ééne seconde verrigt. Men noemt dit gewoonlijk de *levendige kracht*, welke benaming men er aan gegeven heeft, om ze te onderscheiden van eene kracht, die geene beweging veroorzaakt, en daarom veelal *doode kracht* genoemd wordt. Wij zien dus, dat de hoeveelheid beweging MV, welke de grootte van de kracht voorstelt, evenredig is aan de snelheid, terwijl de levendige kracht $\frac{1}{2}MV^2$, die de werking of den arbeid, door die kracht gedurende eene seconde verrigt, uitdrukt, evenredig is aan de tweede magt der snelheid.

56. **Beginsel van de bewaring van kracht.** — Wanneer men van eene kracht gebruik wil maken, om aan een ligchaam beweging mede te deelen, dan zal het slechts zeer zelden het geval zijn, dat men de kracht onmiddelijk op dat ligchaam kan laten werken. Daartoe is gewoonlijk een meer of min zamengesteld werktuig noodig; werktuigen dienen dus slechts, om de werking der krachten van een punt op een ander over te brengen; of, daar eene kracht slechts dan arbeid verrigten kan, wanneer zij beweging veroorzaakt, zoo kunnen wij de werktuigen ook beschouwen als middelen om beweging over te brengen. Om zich dus van de werking van een werktuig eene juiste voorstelling te maken, is het niet voldoende het te beschouwen in den toestand van rust, wanneer de krachten, die daarop werken, in evenwigt zijn; men moet ook uitdrukkelijk nagaan, wat er geschiedt, als het in beweging is.

Daarom hebben wij, van den hefboom (42) sprekende, die een der eenvoudigste werktuigen is, de aandacht gevestigd op de wegen, door de aangrijpingspunten A en B (Fig. 37) der krachten P en Q afgelegd. Even als bij dit eenvoudig werktuig, zal men ook bij de meest zamengestelde de daarop werkende krachten in twee soorten kunnen onderscheiden; in de eerste plaats die, welke dienen om de verlangde werking voort te brengen, en daarom *beweegkrachten* genoemd worden; in de tweede plaats die, welke moeten overwonnen worden, en dus eenen *wederstand* uitoefenen. Deze laatste moeten nogmaals in twee soorten onderscheiden worden; die, welke moeten overwonnen worden, om de verlangde werking te verkrijgen, heeten *nuttige* wederstanden, terwijl de andere, die door de zamenstelling van de werktuigen zelven veroorzaakt worden, *schadelijke* wederstanden genoemd worden. Bij een hefboom bijv. is de kracht, die men met de hand uitoefent, beweegkracht; de last, dien men wil opligten, is de nuttige, de wrijving aan het steunpunt de schadelijke wederstand. Maakt men van eene katrol gebruik om eenen last op te ligten, dan is eveneens het gewigt van dezen

nuttige wederstand, de wrijving aan de spil van de katrol en de stijfheid van het touw schadelijke wederstand, en de kracht, waarmede men trekt, beweegkracht. Wordt een koffenmolen door een stoomwerktuig in beweging gebragt, dan is de stoomkracht, of eigenlijk de kracht, door verbranding der brandstof ontwikkeld, beweegkracht; de cohaesie der moleculen van de graankorrels is de nuttige wederstand; de wrijving van de verschillende deelen van het werktuig, de tegenstand, dien de bewegende deelen door de lucht ondervinden, en nog vele andere, die men wel door zorgvuldige bewerking kan verminderen, doch nimmer geheel verwijderen, maken de schadelijke wederstanden uit.

Passen wij hetgeen van de werking van krachten gezegd is toe op de verschillende krachten, die bij een werktuig in aanmerking komen, dan zal door elke een zekere arbeid verrigt worden. Men onderscheidt dezen dan ook in bewegingsarbeid, nuttigen en schadelijken weêrstandsarbeid, naar gelang van de krachten, waardoor hij verrigt wordt. In de werktuigkunde wordt het algemeene beginsel bewezen, dat, wanneer een werktuig in eenparige beweging is, de bewegingsarbeid altijd gelijk moet zijn aan den weêrstandsarbeid, gedurende denzelfden tijd volbragt. Bij den hefboom hebben wij dit reeds opgemerkt, althans voor het eenvoudige geval, dat de krachten evenwijdig zijn. In fig. 37 is namelijk $P \times AA' = Q \times BB'$, van welke beide uitdrukkingen de eerste den bewegingsarbeid, de laatste den weêrstandsarbeid voorstelt, die verrigt wordt, wanneer de hefboom van den stand AB in den stand A′B′ wordt gebragt. Eigenlijk moeten in plaats van de wegen AA′ en BB′ hunne projectien op de rigtingen van P en Q genomen worden, maar wegens de evenwijdigheid der krachten zijn deze met de wegen evenredig. Wij hebben toen opmerkzaam gemaakt op het beginsel, dat men in snelheid verliest, wat men in kracht wint; dit is dus eigenlijk niets anders, dan het beginsel, dat bewegingsarbeid en weêrstandsarbeid gelijk moeten zijn.

Daar de weêrstandsarbeid altijd uit nuttigen en schadelijken arbeid bestaat, zoo zal de nuttige weêrstandsarbeid alleen geringer moeten zijn dan de bewegingsarbeid. Een werktuig zal echter volmaakter zijn, naarmate men de schadelijke weêrstanden en dus ook hunnen arbeid weet te verminderen; geheel kunnen zij echter nimmer weggenomen worden. Dit maakt, dat bij het gebruiken van een werktuig schijnbaar arbeid verloren gaat; inderdaad toch is dit verlies slechts schijnbaar, want dat gedeelte van den bewegingsarbeid, dat niet noodig was, om nuttige werking voort te brengen, is gebruikt om de schadelijke weêrstanden te overwinnen. Veel minder nog kan de nuttige weêrstandsarbeid aanzienlijker zijn dan de bewegingsarbeid; het is onmogelijk met eene geringe standvastige beweegkracht eenen aanzienlijkeren weêrstand te overwinnen zonder daarbij in snelheid te verliezen. Zij, die het zoo menigmaal besprokene

vraagstuk van de *eeuwigdurende beweging* willen oplossen, stellen zich eigenlijk niets anders voor; uit het hier ontwikkelde hoofdbeginsel van de leer der werktuigen blijkt duidelijk, dat de oplossing tot de onmogelijkheden behoort. Zonder krachtsinspanning kan geene nuttige werking verkregen worden; de mensch kan geene kracht en dus ook geen arbeid scheppen.

Maar evenmin als men nuttigen arbeid kan voortbrengen, grooter dan de aangewende bewegingsarbeid, evenmin kan kracht of arbeid verloren gaan of vernietigd worden. De schijnbaar verlorene arbeid zal zich slechts op eene andere wijze openbaren, die wel is waar niet altijd onmiddelijk merkbaar is, doch niettemin later, welligt onder een anderen tot nog toe ongekenden vorm, zal te voorschijn treden. De kracht en de arbeid blijven dus behouden, en daarom geeft men aan dit beginsel den naam van de *bewaring* of het *behoud van kracht*.

Passen wij dit toe op een eenvoudig voorbeeld. Wanneer men een steen van 50 pond tot eene zekere hoogte, bijv. van 10 ellen, gebragt heeft, dan is er een arbeid verrigt, die wordt gevonden door de kracht, hier het gewigt van 50 pond, met den afgelegden weg van 10 ellen te vermenigvuldigen. Die arbeid van 500 km. is nu als 't ware in den verplaatsten last opgehoopt; die daardoor het vermogen heeft gekregen, om wederom eenen gelijken arbeid te verrigten. Door den steen bijv. aan het eene uiteinde van een touw te bevestigen, dat over eene katrol loopt, en daarna los te laten, zal hij, weder nederdalende, een ander gewigt van nagenoeg 50 kilogrammen tot dezelfde hoogte kunnen brengen; een gedeelte van het in den steen opgehoopte arbeidsvermogen is noodig, om de wrijving op de spil te overwinnen. De arbeid, die hiertoe noodig was, is, hoewel schijnbaar verloren, toch bewaard gebleven. Hij openbaart zich echter op eene geheel andere wijze, namelijk door de warmte, welke in die spil door de wrijving ontstaan is. Die warmte kan weder in anderen arbeid omgezet worden, zooals bijv. bij de stoomwerktuigen geschiedt.

Wij kunnen thans, alvorens de verschillende natuurverschijnselen besproken te hebben, omtrent het beginsel van de bewaring van kracht bezwaarlijk in meerdere ontwikkeling treden; wij zullen echter meermalen de gelegenheid hebben, om daarop terug te komen, en ons te overtuigen, van hoeveel belang het bij de verklaring van die verschijnselen is. Wij zullen bevinden, dat eene strenge inachtneming van dit beginsel voldoende is, om de onhoudbaarheid aan te toonen van verschillende hypothesen, die lange jaren voor geldig gehouden werden, omdat men daarbij uit het oog verloor, dat er geene kracht kan verloren gaan, noch geschapen worden, van welk werktuig men zich ook moge bedienen.

HOOFDSTUK VI.

EVENWIGT EN BEWEGING BIJ VLOEISTOFFEN.

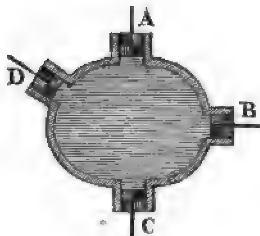
---

57. **Inleiding.** — Wij hebben, van de verschillende toestanden sprekende, waarin de stof kan voorkomen (14), opmerkzaam gemaakt op de gemakkelijkheid, waarmede de deeltjes eener vloeistof van elkander kunnen gescheiden worden, en deze beweegbaarheid tevens aangewezen als een gevolg der moleculaire krachten, die tusschen die deeltjes onderling werkzaam zijn. Uit deze hoofdeigenschap, die het karakter der vloeistoffen als 't ware geheel uitdrukt, alsmede uit de werking, die de zwaartekracht op de moleculen moet uitoefenen, kunnen alle verdere eigenschappen en wetten afgeleid worden, die te zamen de leer van het *evenwigt* en van de *beweging der vloeistoffen* uitmaken. De eerste noemt men *hydrostatica*, de tweede *hydrodynamica*.

A. HYDROSTATICA.

58. **Hoofdbeginsel der hydrostatica, gelijkheid van drukking.** — Eene vloeistof kan niet in evenwigt zijn, zoo niet elk deeltje in alle rigtingen eene even groote drukking ondervindt; want is de drukking, die bijv. van boven naar beneden op een deeltje wordt uitgeoefend, aanzienlijker dan die, welke het in tegenovergestelde rigting ondervindt, dan zal dit, ten gevolge van de gemakkelijkheid, waarmede de deeltjes zich verplaatsen kunnen, terstond in beweging geraken. Dit beginsel is reeds door Archimedes (ongeveer 220 j. v. Chr.) vastgesteld.

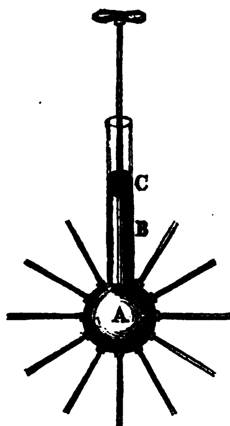
Fig. 55.



Denken wij ons eene vloeistof in een vat van willekeurigen vorm opgesloten, en stellen wij eenvoudigheidshalve, dat zij aan de werking der zwaartekracht onttrokken is, dan zal eene drukking, die in eenig punt van de vloeistof wordt uitgeoefend, zich ten gevolge van de bewegelijkheid der deeltjes, onveranderd in alle rigtingen moeten voortplanten. Wordt bijv. op eenen zuiger A (Fig. 55), in den wand van zoodanig vat aangebragt, eene drukking van 10 pond uitgeoefend,

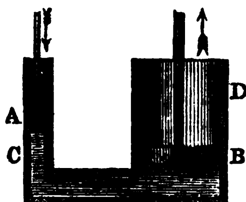
dan zal deze drukking zich onmiddelijk mededeelen aan de waterdeeltjes, die met den zuiger in aanraking zijn, van deze weder aan de volgende, en zoo voort, niet alleen in de rigting der drukking, maar in alle rigtingen. Elk der zuigers B, C, D, die even groot als A genomen zijn, zal dus met eene even groote kracht uitgedreven worden, als die waarmede A ingedrukt wordt, en men zoude dus op elk eene even groote drukking van 10 pond moeten uitoefenen om evenwigt te maken, en de vloeistof te beletten buiten het vat te komen. Dat de voortplanting der drukking in alle rigtingen geschiedt, blijkt door middel van den toestel, in fig. 56 afgebeeld. Drukt men op den zuiger C, dan zal het water, dat in den cilinder B en den hollen bol A bevat is, gelijkelijk uit alle openingen uitgeperst worden, hetgeen het geval niet zoude zijn, zoo de drukking alleen in hare eigene rigting voortgeplant werd.

Fig. 56.



Daar elk der zuigers B, C, D (Fig 55) eene even groote drukking ondervindt, als die, welke op A wordt uitgeoefend, zoo zal klaarblijkelijk een zuiger, die eene tweemaal grootere oppervlakte heeft, ook eene tweemaal grootere drukking ondervinden; de drukking op elke eenheid van oppervlakte moet dezelfde zijn, en de geheele drukking is dus zooveelmaal grooter, als de oppervlakte zelve grooter is. Deze eigenschap stelt ons in staat, om de drukking in zoodanige verhouding te vermeerderen, als wij slechts verlangen. Geeft men aan het vat eene gedaante, als in fig. 57 is voorgesteld, waarin C en D twee cilinders zijn, die van onderen met elkander gemeenschap hebben, en waarin zich twee zuigers A en B bewegen, dan zal, wanneer de oppervlakte van den zuiger B 100 maal grooter is dan die van A, eene drukking van 10 pond op dezen laatsten, door de vloeistof voortgeplant, op den zuiger B eene drukking van 1000 pond veroorzaken. Hoewel het bij eene oppervlakkige beschouwing schijnen moge, dat door zoodanige inrigting kracht voortgebragt wordt, zoo is het echter voldoende, zich de zuigers in den toestand van beweging voor te stellen, om zich te overtuigen, dat de bewegingsarbeid en de weêrstandsarbeid even groot zijn. Immers daar de vloeistof, die van C naar D geperst wordt, zich daar over eene 100 maal grootere oppervlakte moet uit-

Fig. 57.



spreiden, zal de zuiger B een 100 maal geringeren weg afleggen dan de zuiger A, en er wordt dus in snelheid verloren, wat er in kracht gewonnen wordt.

Op dit beginsel rust de werking der hydrostatische pers, van welke wij later eene beschrijving zullen geven, wanneer wij de andere natuurwetten zullen hebben leeren kennen, die bij hare zamenstelling in toepassing komen.

59. **Evenwigt van zware vloeistoffen.** — Wanneer eene vloeistof zich in een vat bevindt, dan zal het gevolg van de werking der zwaartekracht zijn, dat de oppervlakte loodregt op de rigting der zwaartekracht, dat is horizontaal, moet wezen. Want was dit niet het geval, dan zoude men het gewigt van een vochtdeeltje, door *mp* (Fig. 58) voorgesteld, kunnen ontbinden in twee krachten, de eene *mr* loodregt op de oppervlakte, de andere *mq* volgens de raaklijn gerigt. Deze laatste zoude eene verplaatsing van het vochtdeeltje ten gevolge hebben, en er zoude dus geen evenwigt kunnen zijn.

Fig. 58.



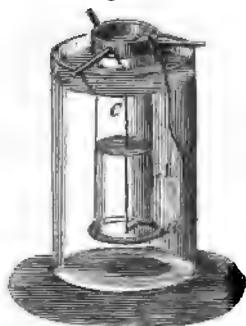
De oppervlakte van een stilstaand water kan dus als vlak aangemerkt worden, wanneer het gedeelte, dat men beschouwt, klein is in vergelijking van de aarde, zoodat men de rigting der zwaartekracht in de verschillende punten als dezelfde kan aannemen. Dit vlak noemt men daarom het *waterpas-vlak*; terwijl men aan de oppervlakte van het water doorgaans den naam van *waterspiegel* geeft. Beschouwt men grootere uitgestrektheden, dan is het oppervlak bolvormig, zoo als men zich op zee gemakkelijk kan overtuigen.

Een tweede gevolg van de werking der zwaartekracht is, dat alle deeltjes, in eene zelfde horizontale laag gelegen, eene gelijke drukking ondergaan, die des te grooter zal wezen, naarmate de afstand van die laag tot de oppervlakte grooter is. Immers het is duidelijk, dat een waterdeeltje benedenwaarts gedrukt wordt door het gewigt van alle deeltjes, die zich daar boven bevinden; dit gewigt of deze drukking zal dus even groot moeten wezen voor alle deeltjes, die even ver van de oppervlakte verwijderd zijn; want het is gemakkelijk in te zien dat, wanneer van twee in dezelfde horizontale laag gelegene deeltjes het éène eene grootere drukking ten gevolge van de zwaartekracht ondervond, de groote bewegelijkheid der moleculen het evenwigt onmogelijk zoude maken.

Uit de hoofdvoorwaarde van evenwigt in eene vloeistof, dat elk deeltje op zich zelf beschouwd in alle rigtingen eene even groote drukking ondergaat, volgt verder, dat de lager gelegene deeltjes niet alleen eene vertikale druk-

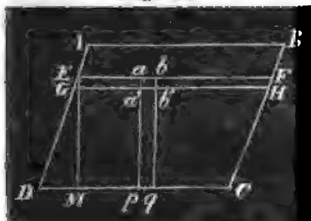
king ondergaan, veroorzaakt door die welke zich daar boven bevinden, maar ook, dat deze drukking in alle rigtingen wordt uitgeoefend, evenzeer van beneden naar boven en zijdelings, als van boven naar beneden. Men kan zich door eene eenvoudige proef hiervan overtuigen. In een glazen vat met water (Fig. 59) dompelt men eenen onder en boven openen glazen cilinder A, waarvan de onderkant zeer glad afgeslepen is, zoodat eene glazen plaat B er volkomen tegen aan sluit. Wordt deze glazen plaat door middel van eene koord C tegen den cilinder A aangetrokken en deze dan onder water gehouden, zoo als in de afbeelding is aangewezen, dan zal, wanneer men de koord loslaat, de plaat B niet van den cilinder afvallen. De oorzaak hiervan is alleen te zoeken in de opwaartsche drukking, welke de vloeistof tegen de plaat uitoefent. Schenkt men een weinig water binnen in den cilinder, dan zal dit op de plaat eene drukking naar beneden uitoefenen; de plaat zal dan echter nog niet van den cilinder afvallen; dit zal eerst geschieden, als het water er binnen in even hoog staat als er buiten. Hieruit blijkt dus, dat de opwaartsche drukking even groot is, als de benedenwaartsche, welke de deeltjes bij B zouden ondervinden. Bij de proef zal men echter bevinden, dat de glazen plaat reeds afvalt, voor het water binnen in den cilinder even hoog staat als daar buiten; dit komt door dat de plaat door haar eigen gewigt ook tracht af te vallen.

Fig. 59.



60. **Drukking op den bodem.** — Wij hebben bij de voorgaande proef reeds opmerkzaam gemaakt op de drukking, welke de in den cilinder geschonkene vloeistof uitoefent op de glazen plaat, die eigenlijk den bodem er van uitmaakt. Wij moeten nu nagaan, hoe men die drukking steeds bepalen kan, welke ook de vorm van het vat zij.

Fig. 60.



Stellen wij te dien einde, dat een vat ABCD (Fig. 60), welks vorm wij geheel willekeurig onderstellen, tot EF met eene vloeistof gevuld is. Eenvoudigheidshalve nemen wij aan, dat op de oppervlakte der vloeistof geene drukking wordt uitgeoefend. Beschouwen wij nu de bovenste laag GHFE, dan zal in $a'b'$ eene drukking worden uitgeoefend, gelijkstaande met het gewigt van het vochtkolommetje $abb'a'$. Dit gewigt wordt uitgedrukt door $ab.h.d$, wanneer de hoogte $aa' = h$, en het

soortelijk gewigt of de digtheid der vloeistof *d* genoemd wordt; de drukking in *a'b'* is dus *ab.h.d.* Voor elke volgende laag van gelijke dikte is het gewigt of de vermeerdering van de drukking weder *ab.h.d*, zoodat wanneer er *n* lagen zijn van *ab* tot *pq* de drukking op *pq* zal bedragen *ab.n.h.d.* Nu is echter $n.h = EM$ en $ab = pq$, zoodat de drukking in *pq* wordt uitgedrukt door *pq*. EM. *d*. Daar echter alle deeltjes der vloeistof, die met den bodem in aanraking zijn, in een zelfde horizontaal vlak liggen, en dus eene gelijke drukking moeten ondervinden, zoo zal men voor de drukking op den geheelen bodem vinden CD.EM.*d*. Deze formule duidt het gewigt aan van een vochtcilinder, die den bodem tot grondvlak, en de hoogte van den waterspiegel boven den bodem tot hoogte heeft; zij toont dus, dat de drukking op den bodem onafhankelijk is van den vorm van het vat.

Fig. 61.

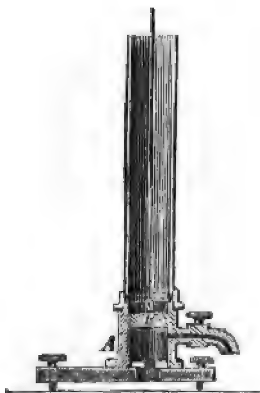


Fig. 62.

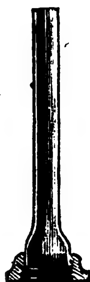
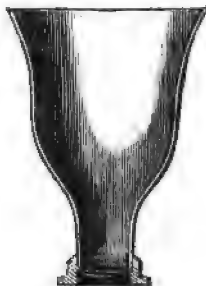


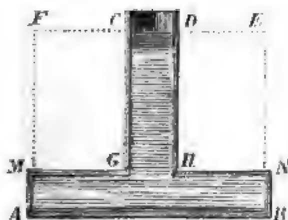
Fig. 63.



Men kan deze opmerkelijke eigenschap op de volgende wijze proefondervindelijk aantoonen. In fig. 61 is A een holle metalen cilinder, waarin zich een naauwkeurig passende en niet al te ligte zuiger B gemakkelijk kan op en neêr bewegen. Op dezen cilinder kunnen verschillende vaten geschroefd worden, zoo als er in fig. 61, 62 en 63 zijn voorgesteld. Aan den zuiger B bevindt zich een haak, waaraan eene koord bevestigd wordt, die men aan den eenen arm van den evenaar eener balans vastmaakt. Op de schaal aan den anderen arm worden gewigten geplaatst, om met dien zuiger evenwigt te maken. Schenkt men nu water in het boven den cilinder geschroefde vat, dan zal dit eene drukking uitoefenen op den zuiger, die zich dientengevolge benedenwaarts zal bewegen;

door gewigten op de schaal herstelt men het evenwigt. Deze gewigten wijzen dan de op den zuiger uitgeoefende drukking aan, en men zal bevinden dat deze juist gelijk is aan het gewigt van eenen watercilinder, die den zuiger tot grondvlak, en de hoogte van den waterspiegel boven dezen tot hoogte heeft. Schroeft men vervolgens een der vaten op den cilinder, in fig. 62 en 63 voorgesteld, en schenkt men daarin water tot eene gelijke hoogte, dan zal men bevinden, dat men evenveel gewigten op de schaal moet plaatsen, om evenwigt te maken, en dat de drukking dus even groot is.

Fig. 64.



Het gevolg van deze eigenschap is, dat men met eene geringe hoeveelheid water eene drukking kan uitoefenen, veel aanzienlijker dan haar gewigt. Heeft men bijv. een vat van den vorm van fig. 64, dan zal, wanneer de vloeistof tot CD staat, op den bodem eene drukking worden uitgeoefend, gelijk aan het gewigt eener vochtkolom ABEF. Bij eene oppervlakkige beschouwing schijnt het vreemd, dat de drukking op den bodem aanzienlijker is dan het gewigt, en dat dus, wanneer deze toestel op de schaal eener balans geplaatst wordt, de drukking op de schaal geringer is, dan die op den onmiddelijk daarmede in aanraking zijnde bodem van het vat. Men kan zich echter hiervan rekenschap geven door op te merken, dat wel alle deeltjes, die even hoog als GH liggen, eene drukking ondervinden, veroorzaakt door de daarboven staande waterkolom CDHG, doch dat, daar deze drukking gelijkelijk in alle rigtingen uitgeoefend wordt, de bovenwand MGHN ook eene even groote opwaartsche drukking zal moeten ondervinden. Vermindert men de drukking op den bodem met de opwaartsche drukking tegen MG en HN, dan zal men tot rest het gewigt der geheele watermassa verkrijgen. Hoewel zich onmiddelijk boven MG en HN geen vocht bevindt, zal men toch, door de buis CDHG lang te nemen, ook op dit gedeelte van den bovenwand eene aanzienlijke drukking kunnen uitoefenen, zoo zelfs, dat die wand niet sterk genoeg is om daaraan wederstand te bieden, en dat het vat springt.

Wij mogen hier niet onopgemerkt laten, dat de grootere drukking, in zoodanig geval op den bodem uitgeoefend, alleen het gevolg is van den vloeibaren toestand. Werd de vloeistof een vast ligchaam van den zelfden vorm, zoo als wanneer het water in ijs veranderde, dan zoude de drukking op den bodem eenvoudig gelijk zijn aan het gewigt van dat vaste ligchaam; maar dan wordt op den bovenwand MN ook geene drukking meer uitgeoefend.

61. **Drukking op de zijwanden.** — Daar de deeltjes eener vloeistof in alle rigtingen eene drukking op elkander uitoefenen, moet zij ook tot op de zijwanden van het vat voortgeplant worden; de drukking op deze zal daarom onafhankelijk zijn van den vorm of van de rigting dier wanden, maar alleen aangewezen worden door het gewigt van de vochtkolom, die zich er boven bevindt. De drukking moet steeds loodregt op den wand gerigt zijn; want was dit niet het geval, dan kon men ze ontbinden in eene loodregte drukking en eene andere, in de rigting van den wand werkende; deze laatste ontbondene zoude het evenwigt onmogelijk maken. Proefondervindelijk blijkt dit, wanneer men eene opening in den wand maakt; de vloeistof spuit er terstond uit in eene rigting loodregt op den wand.

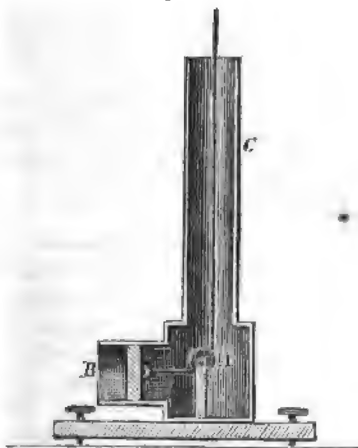
Daar de lager gelegene deelen van den wand eene grootere drukking ondervinden, dan de hoogere, is het moeijelijker, om de totale drukking op den geheelen zijwand te berekenen, wanneer deze juist niet de allereenvoudigste gedaante heeft. De algemeene regel, waartoe men door wiskundige beschouwingen geraken kan, leert, dat de drukking op eenig gedeelte van den zijwand gelijk is aan het gewigt eener vochtkolom, welke dat gedeelte van den wand tot grondvlak, en den afstand van den waterspiegel tot het zwaartepunt van dat gedeelte van den wand tot hoogte heeft. Is de zijwand dus een regthoek, wiens zwaartepunt in het midden gelegen is, dan zal de drukking gevonden worden, door de oppervlakte van dien wand te vermenigvuldigen met de halve hoogte van den waterspiegel boven den bodem, en met het soortelijk gewigt der vloeistof. Is de zijwand een driehoek, of, zooals veelal het geval is, een trapezium, dan wordt de berekening reeds meer zamengesteld, dewijl de plaats van het zwaartepunt van den bevochtigden zijwand niet op eene zoo eenvoudige wijze wordt aangewezen. Wij moeten hierbij nog opmerken, dat de stand van den wand niets ter zake doet, dan alleen in zooverre, dat bij gelijke hoogte van den waterspiegel boven den bodem een wand, die eene helling heeft, een grooter oppervlak heeft dan een vertikale wand.

Men kan zich voorstellen, dat de som van alle drukkingen, op den zijwand uitgeoefend, door eene enkele kracht vervangen wordt; deze zal klaarblijkelijk, ingeval de wand vlak is, door de som worden aangeduid. Het is echter niet voldoende de grootte dier drukking te kennen; men moet ook haar aangrijpingspunt kunnen bepalen, daar dit punt in de eerste plaats zoude moeten ondersteund worden, indien ondersteuning noodig geacht wordt. De plaats van dit punt, dat *middelpunt van persing* genoemd wordt, kan in de meeste gevallen niet zonder ingewikkelde berekeningen bepaald worden. Het is echter altijd lager dan het zwaartepunt van den zijwand gelegen, omdat de drukkingen op het laagste gedeelte van den wand grooter zijn, dan die op het

bovenste gedeelte. Bij regthoekige zijwanden ligt het op twee derde, van den waterspiegel afgerekend.

Van de juistheid dezer wet kan men zich ook proefondervindelijk overtuigen door middel van een dergelijken toestel, als voor de drukking op den bodem gebruikt is. In fig. 65 is A een vierkant kastje, aan welks eenen zijwand een cilindervormig stuk B gezet is, waarin zich een zuiger kan bewegen. Binnen in A bevindt zich een katrolletje, waarover de koord gaat, die den zuiger met den arm eener balans verbindt. Wordt nu in het op A geplaatste vat C tot eene zekere hoogte water gegoten, dan zal de zijdelingsche drukking tegen den zuiger in B worden uitgedrukt door het produkt van zijne oppervlakte met de hoogte van den waterspiegel boven zijn middenpunt, en de digtheid der vloeistof. Men zal echter, wanneer men op de schaal van den anderen arm der balans gewigten legt, rekenschap moeten houden van de wrijving, die de zuiger in den cilinder B ondervindt. Plaatst men op A vaten van een' anderen vorm dan C, dan zal men bevinden, dat ook de drukking op de zijwanden even groot is, mits slechts de hoogte van den waterspiegel dezelfde blijft.

Fig. 65.



62. **Evenwigt van verschillende vloeistoffen in één vat.** — Wanneer men in een glas vloeistoffen van verschillende digtheid schenkt, dan zullen deze, tot rust gekomen, eenen zekeren evenwigtstoestand aannemen, die ook gemakkelijk uit de voorgaande algemeene eigenschappen kan afgeleid worden. Door de werking der zwaartekracht, in verband met de beweegbaarheid der deeltjes, zal de zwaarste vloeistof zich onder in het glas begeven, terwijl de andere zich daar boven zullen plaatsen in de volgorde van hare digtheid. Voorts zullen de afscheidingsvlakken der verschillende vloeistoffen alle horizontale vlakken moeten zijn; want was zulks niet het geval, dan zoude de drukking niet in alle punten van eene zelfde horizontale laag even groot wezen. Immers, daar de oppervlakte der bovenste vloeistof horizontaal moet zijn (59), zoude wel op elk dezer punten eene even hooge,

doch niet eene even zware kolom rusten, en het evenwigt zoude dus onmogelijk zijn. Men kan zich het gemakkelijkst hiervan overtuigen, door in een zelfde glas kwikzilver, eene verzadigde oplossing van koolzure potassa in water, niet al te sterken alcohol dien men rood gekleurd heeft, en bergolie of naphta te schenken. Het kwikzilver zal onderin blijven, daarboven het water, dat door het opgeloste zout grootere digtheid verkregen heeft, vervolgens de alcohol, die zich niet met het water vermengt, omdat de koolzure potassa in alcohol niet oplosbaar is, en bovenop de ligte bergolie.

Van dit verschijnsel vindt men ook in de natuur de bevestiging. Op vele plaatsen blijkt het water, voornamelijk aan de mondingen der rivieren, op eene grootere diepte eene aanzienlijkere digtheid te hebben, dan aan de oppervlakte. Men schrijft dit voornamelijk daaraan toe, dat bij den vloed het zwaardere zeewater onder het ligtere rivierwater dringt, en dit als 't ware opligt.

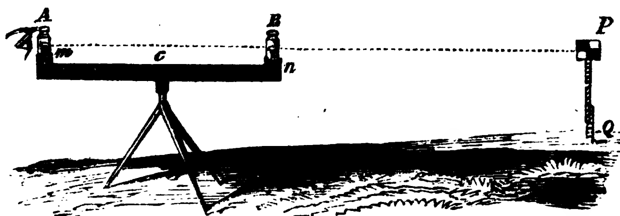
63. **Vaten, die gemeenschap met elkander hebben.** — Zijn in fig. 66 A en B twee vaten, welke door middel van het gedeelte C met elkander gemeenschap hebben, dan moeten in den toestand van evenwigt alle deeltjes, die zich in de horizontale laag MN bevinden, eene gelijke drukking ondervinden. Daar deze drukking slechts afhankelijk is van de vochtkolom, die zich er boven bevindt, zoo zal, ingeval de vloeistof in beide gedeelten A en B dezelfde is, de hoogten DM en EN gelijk moeten zijn. De bovenste oppervlakken van de vloeistof moeten dus in beide vaten, of zoo er meer zijn, in alle vaten, die met elkander gemeenschap hebben, in hetzelfde horizontale vlak gelegen zijn. Uit hetgeen vroeger van de drukking is gezegd blijkt, dat de vorm der vaten geenen invloed hierop uitoefent; alleen bij naauwe buizen heeft, zooals wij later zullen zien, eenige afwijking van deze wet plaats.

Fig. 66.



Deze eigenschap vindt vele toepassingen. Eene der eenvoudigste is die van het zoogenaamd fleschjeswaterpas, in fig. 67 afgebeeld, waarvan men zich bedient om te bepalen, hoeveel eenig punt hooger of lager dan een ander gelegen is. Deze toestel bestaat uit twee glazen fleschjes A en B zonder bodem, doch door middel van eene blikken of koperen buis C met elkander gemeenschap hebbende; wordt hierin water geschonken, dan zal dit in beide fleschjes even hoog staan; de punten *m* en *n* liggen dus in hetzelfde waterpas. Plaatst men zich met het oog achter A, en ziet men langs

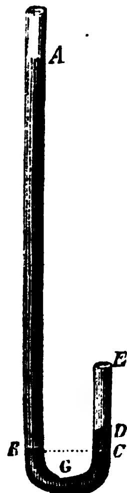
Fig. 67.



m en *n*, dan zal een punt P, dat in het verlengde der lijn *mn* gelegen is, ook in hetzelfde horizontale vlak, dus even hoog gelegen zijn. Door den afstand van de lijn *mn* tot den grond, alsmede de lengte van PQ te meten, en deze twee van elkander af te trekken, zal men dus vinden hoeveel het punt Q hooger of lager gelegen is, dan de voet D van den toestel.

Eene andere toepassing van de eigenschap van vaten, die gemeenschap met elkander hebben, is de zoogenaamde waterpeilbuis. Dit is eene glazen buis, verbonden met een vat met ondoorzigtige wanden. Daar de vloeistof in beide even hoog moet staan, zal de stand in de buis tevens den stand in het vat aanwijzen.

Fig. 68.



Wanneer de vloeistoffen, die zich in de beide vaten bevinden, ongelijke digtheid hebben, dan kan men ook gemakkelijk bepalen, welken stand zij moeten aannemen. Zij bijv. AE (Fig. 68) eene omgebogene glazen buis, welke dus kan beschouwd worden als bestaande uit twee vaten AB en EC, door middel van het onderste gedeelte BC gemeenschap met elkander hebbende, de zwaarste vloeistof zal zich terstond naar beneden begeven; wanneer er echter in den langen arm eene ligtere vloeistof geschonken wordt, dan zal de zwaarste vloeistof niet meer in beide armen even hoog staan. Denken wij ons door hare bovenste oppervlakte B een horizontaal vlak, dan zal het gedeelte BG met CG evenwigt maken; de deeltjes, die zich in B en C bevinden, moeten dus eene gelijke drukking ondervinden. De drukking in B op de vierkante eenheid zal worden voorgesteld door hd, wanneer h de hoogte en d de digtheid voorstelt. Zijn h' en d' de hoogte en digtheid der andere vloeistof, dan zal de drukking van de kolom DC op de vierkante eenheid in C $h'd'$ bedragen. Daar B en C gelijk gedrukt

moeten zijn, moet $hd = h'd'$ wezen en dus $h : h' = d' : d$, dat is, *de hoogten der vochtkolommen zijn omgekeerd evenredig aan de digtheid der vloeistoffen.* Zijn bijv. de twee vochten kwikzilver en water, waarvan het eerste een ruim $13\frac{1}{2}$ maal grooter soortelijk gewigt heeft dan het laatste, dan zal ook de kolom BA $13\frac{1}{2}$ maal hooger zijn dan CD, beide gerekend van een horizontaal vlak, gaande langs het afscheidingsvlak van het kwikzilver en het water.

Men zoude zich van deze eigenschap kunnen bedienen om de digtheid van vloeistoffen te bepalen. Men behoeft daartoe slechts de hoogten te meten van twee vochtkolommen, die in twee vaten, die gemeenschap met elkander hebben, evenwigt met elkander maken; daar de digtheden omgekeerd evenredig moeten zijn aan die hoogten, behoeft men slechts de digtheid der eene vloeistof te kennen, om onmiddelijk daaruit die der andere te kunnen afleiden. Wij zullen echter weldra naauwkeuriger en eenvoudiger middelen leeren kennen, om hetzelfde doel te bereiken.

64. **Drukking op ondergedompelde ligchamen; wet van Archimedes.** — Even als de deeltjes eener vloeistof op de wanden van het vat, waarin zij zich bevindt, eene loodregte drukking uitoefenen, evenzoo zullen zij ook op een ligchaam, dat van alle zijden door die vloeistof omgeven is, eene drukking uitoefenen, loodregt op zijne oppervlakte gerigt; en daar de drukking, die de lager gelegene vochtdeeltjes ondervinden en uitoefenen, aanzienlijker is dan die der hooger liggende, zoo zal de drukking op het ligchaam ook grooter zijn, naarmate het dieper ondergedompeld is. Men kan zich door eene eenvoudige proef hiervan overtuigen. Men neemt eene blaas met een gekleurd vocht gevuld, en met eene naauwe glazen buis verbonden, waarin het vocht klimt, als de blaas gedrukt wordt. Houdt men deze in een vat of glas met water, dan zal men bemerken, dat het gekleurde vocht hooger in de buis staat, naarmate de blaas dieper onder water gehouden wordt. Wanneer eene ledige doch geslotene flesch diep in zee wordt nedergelaten, dan zal òf de kurk door de drukking van de hooge waterkolom er ingedreven worden, òf de flesch zal breken.

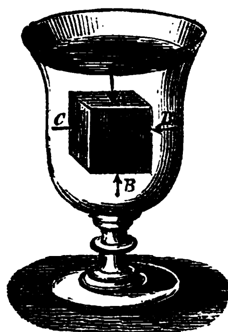
Het laat zich ligt inzien, dat de drukking der vloeistof op het gewigt van het ondergedompelde ligchaam eenen zekeren invloed moet uitoefenen; die drukking zal namelijk met het gewigt van het ligchaam moeten zamengesteld worden, en het zal van de resultante van deze beide afhangen, of het ligchaam in evenwigt zal kunnen zijn. Om hiertoe te geraken is het dus in de eerste plaats noodig, dat wij naauwkeurig de grootte der drukking van de vloeistof op het ligchaam leeren bepalen.

Stellen wij ons te dien einde voor, dat het ligchaam uit de vloeistof is ge-

nomen; eene vochtmassa van gelijk volume als het ligchaam zal dan weder zijne plaats ingenomen hebben. Daar deze vochtmassa in evenwigt is, en als geheel op zich zelve mag beschouwd worden, zoo moet men aannemen, dat de krachten, die er op werken, elkander vernietigen. Die krachten zijn slechts tweederlei; vooreerst het gewigt dier vochtmassa, en ten tweede de drukking, die zij ondervindt van de omliggende vochtdeeltjes. Deze twee krachten kunnen geen evenwigt met elkander maken, tenzij zij gelijk en tegenovergesteld zijn. De drukking der vloeistof op de bedoelde vochtmassa moet dus van beneden naar boven gerigt zijn, en gelijk zijn aan haar gewigt. De drukking der omliggende deeltjes moet noodzakelijk dezelfde blijven, als men die vochtmassa weder door het even groote ondergedompelde ligchaam vervangt; dit zal dus ook eene opwaartsche drukking ondervinden, gelijk aan het gewigt der vochtmassa, wier plaats het inneemt. Daar deze drukking tegenovergesteld gerigt is aan de zwaartekracht, en de resultante der beide op het ligchaam werkende krachten dus door haar verschil wordt uitgedrukt, kan men zeggen, dat *een ligchaam in eene vloeistof zooveel aan gewigt verliest, als de door hetzelve verplaatste vochtmassa weegt.* Deze belangrijke wet wordt gewoonlijk genoemd naar Archimedes, die ze ongeveer 220 jaar v. Chr. te Syracuse ontdekte.

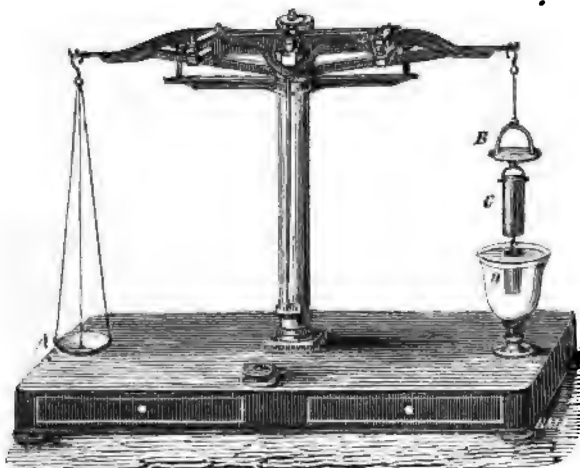
Bij eene oppervlakkige beschouwing kan het vreemd schijnen, dat het verlies aan gewigt niet vermeerdert, wanneer het ligchaam tot eene grootere diepte beneden den waterspiegel wordt ondergedompeld, daar dan toch de vochtkolom, die zich er boven bevindt, veel grooter, en dus de drukking der vochtdeeltjes op het ligchaam aanzienlijker is. Door eene eenvoudige redenering kan men zich echter overtuigen, dat de plaats van het ligchaam in de vloeistof, mits het geheel ondergedompeld is, geenen invloed daarop kan uitoefenen. Stellen wij ons eenvoudigheidshalve voor, dat een prismatisch ligchaam zich geheel in eene vloeistof bevindt, zoo als in fig. 69 is voorgesteld. Dit ligchaam zal in alle punten zijner oppervlakte eene normale drukking ondervinden, afhankelijk van de hoogte van den waterspiegel boven die punten. De tegenovergestelde vertikale zijvlakken C en D zullen dus tegenovergestelde en gelijke drukkingen ondervinden, welke elkander vernietigen. Hetzelfde is het geval met het voorvlak en het achtervlak. Het bovenvlak A wordt gedrukt door eene vochtkolom, tot grondvlak hebbende het vlak A en tot hoogte

Fig. 69.



de hoogte van den waterspiegel boven dat vlak; op het benedenvlak daarentegen drukt eene vochtkolom, den afstand van B tot den waterspiegel tot hoogte en B tot grondvlak hebbende. Deze drukking wordt echter van beneden naar boven uitgeoefend, terwijl die op het bovenvlak benedenwaarts plaats heeft. Als resultante dezer beide drukkingen blijft dus het gewigt over eener vochtmassa van hetzelfde volume als het ligchaam zelf. Even als wij het hier voor een prisma hebben betoogd, zal men ook voor elk onregelmatig ligchaam door eene dergelijke doch een weinig meer ingewikkelde redenering kunnen aantoonen, dat de opwaartsche drukking, of het gewigtsverlies van het ligchaam onafhankelijk is van de plaats, waar het zich in de vloeistof bevindt, en alleen van het volume van het ligchaam en van de digtheid der vloeistof afhangt.

Fig. 70.



Van de juistheid van de wet van Archimedes kan men zich proefondervindelijk op de volgende wijze overtuigen. Fig. 70 stelt eene balans voor, welke aan den eenen arm eene gewone schaal A heeft, doch aan den anderen eene zeer korte schaal B, die van onderen met een haak is voorzien, waaraan men een te wegen voorwerp kan ophangen, en die even zwaar is als de schaal A. Onder aan B hangt men nu een hol koperen cilindertje of emmertje C, en onder dit een massief koperen cilindertje D, dat juist in C past, en dus een volume heeft, volkomen gelijk aan den inhoud van het emmertje. Op de schaal A worden gewigten gelegd, totdat er evenwigt is. Plaatst men nu onder de korte schaal een glas met water, waarin de cilinder D geheel onderdompelt, dan zal men bevinden, dat het evenwigt verbroken is; schenkt men echter het cilindertje C vol water, dan zal het evenwigt weder hersteld zijn. De cilinder D heeft dus door de indompeling onder het water juist zooveel aan gewigt verloren, als de hoeveelheid water, in C bevat, weegt, dat is,

juist zooveel als het gewigt bedraagt van de vloeistof, wier plaats het ingenomen heeft.

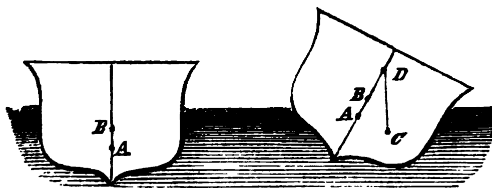
65. **Evenwigt van ondergedompelde en drijvende ligchamen.** — De evenwigtstoestand van een ondergedompeld ligchaam zal afhankelijk zijn van zijn eigen gewigt en van dat der vochtmassa, wier plaats het inneemt. Is het ligchaam zwaarder dan de verplaatste vloeistof, dan zal de resultante dezer beide krachten benedenwaarts gerigt zijn, en het ligchaam zal tot op den bodem van het vat zinken. Is het juist even zwaar, dan zullen de beide krachten elkander vernietigen, en het ligchaam zal dus in elken stand in evenwigt zijn. Dit zal bijv. het geval zijn, wanneer men 225 deelen witte was met een deel vermiljoen goed doöreenmengt; deze massa onder water gedompeld zal daarin zwevende blijven. Is het ligchaam daarentegen ligter dan het verplaatste water, zoodat de opwaarts werkende kracht grooter is dan het gewigt, dan zal de resultante dezer beide krachten ook naar boven gerigt zijn, en het ligchaam zal zich dus naar boven bewegen, totdat het zich gedeeltelijk buiten de vloeistof bevindt. Eerst dan zal het in evenwigt zijn, als het gewigt van het geheele ligchaam gelijk is aan het gewigt van de vloeistof, door het ondergedompelde gedeelte verplaatst; want dan eerst zullen de beide tegenovergestelde krachten even groot zijn. Men zegt dan dat het ligchaam drijft. Massieve homogene ligchamen zullen dus zinken, als de stof waaruit zij zijn zamengesteld grootere digtheid heeft, dan het water; zij zullen drijven, als hun soortelijk gewigt geringer is; zij blijven zwevende, als de digtheid even groot is.

De wet van Archimedes maakt het ook duidelijk, hoe ligchamen, vervaardigd uit eene stof, welke soortelijk zwaarder dan de vloeistof is, zooals bijv. ijzeren schepen, kunnen drijven. Bij deze toch zal het gewigt door den bijzonderen vorm geringer zijn, dan dat van de verplaatste vloeistof. Een schip, dat 5000 centenaars weegt, zal zoo diep in het water zakken, tot de hoeveelheid van het verplaatste water 500 kubieke ellen bedraagt. Men kan dus het gewigt van een schip bepalen, door het volume van de verplaatste vochtmassa, of wat hetzelfde is, den inhoud van het schip tot aan de waterlijn, te meten.

Een ligchaam, dat in eene vloeistof zwevende is, of op hare oppervlakte drijft, zal echter niet in alle standen in evenwigt zijn. Daartoe is het noodig, dat de twee tegenovergestelde krachten, het gewigt van het ligchaam en de opwaartsche drukking der vloeistof, werken in twee punten, die in dezelfde vertikaal gelegen zijn; want is zulks niet het geval, dan heeft men een stelsel van twee gelijke en evenwijdige, doch tegenovergesteld gerigte krachten, die dus een koppel (33) vormen, en aan het ligchaam eene draaijende beweging

zullen geven. Het aangrijpingspunt van het gewigt van het ligchaam is zijn zwaartepunt; dat van de opwaartsche drukking is het zwaartepunt der verplaatste vloeistof, daar deze drukking niet anders is dan het gewigt dier vochtmassa, doch opwaarts werkende; men noemt dit punt gewoonlijk het middenpunt van opwaartsche drukking. Is het ligchaam geheel ondergedompeld en homogeen, dan vallen deze twee punten in één, en een zwevend homogeen ligchaam zal dus in elken stand in evenwigt zijn, welke ook zijn vorm zijn moge. Is het niet homogeen, zoodat het middenpunt van opwaartsche drukking en het zwaartepunt niet zamenvallen, dan zal zich het laatste onder het eerstgenoemde plaatsen. Bevindt zich een ligchaam slechts gedeeltelijk onder water, dan zullen die twee punten evenmin zamenvallen; het ligchaam zal dan in den toestand van standvastig evenwigt zijn, als het zwaartepunt zich onder het middenpunt der opwaartsche drukking bevindt; is het daarboven gelegen, dan is het evenwigt veranderlijk. Drijvende ligchamen kunnen echter somtijds toch in standvastig evenwigt zijn, al ligt het zwaartepunt boven het middenpunt van opwaartsche drukking. Een schip zal bijv. in standvastig evenwigt zijn, wanneer, zooals in den eersten stand van fig. 71, het zwaartepunt A van het schip onder het zwaartepunt B van het verplaatste water gelegen is. Was daarentegen A het middenpunt van opwaartsche drukking, en B het zwaartepunt van het schip, dan zal het zich toch nog in standvastig evenwigt kunnen bevinden. Stellen wij namelijk, dat het in den tweeden stand van fig. 71 gebragt wordt, dan zal het zwaartepunt van de verplaatste vochtmassa, die nu eene geheel andere gedaante heeft aangenomen, zich niet meer in A, maar ergens in C bevinden. Het gewigt van het schip werkt dan benedenwaarts in het punt B, de drukking der vloeistof opwaarts in C; deze twee krachten zullen dan het schip doen draaijen, en wel zoodanig, dat het tot den eersten stand terugkeert. Het evenwigt is dus standvastig; men zal ligt inzien, dat het zulks blijven zal, zoo lang de vertikaal, door het zwaartepunt C getrokken, de lijn AD boven het zwaartepunt B ontmoet. Het ontmoetingspunt D wordt *metacentrum* genoemd, en het evenwigt zal dus standvastig zijn, wanneer het zwaartepunt van het ligchaam slechts beneden het metacentrum gelegen is.

Fig. 71.



Door de eigenschappen van ondergedompelde ligchamen laten zich vele verschijnselen verklaren. Een zware last verliest onder water zooveel aan gewigt,

als het verplaatste water bedraagt; daarom kan men onder water veel zwaardere lasten optillen, dan daar buiten; daardoor kan men zich ook voorstellen, hoe het mogelijk is, dat zeer groote steenen door den stroom van rivieren kunnen medegesleept worden. Ook de verschijnselen bij het zwemmen worden daardoor verklaard. De visschen, die onder water zwemmen, moeten evenveel wegen, als de watermassa, waarvan zij de plaats innemen; daar echter hun ligchaam, uit ongelijksoortige deelen zamengesteld, niet homogeen is, behooren zij steeds in standvastig evenwigt te zijn. Hun ligchaam is daartoe bijzonder geschikt door de zoogenaamde zwemblaas, die zich in het bovenste gedeelte van het ligchaam bevindt, en dus maakt, dat het zwaartepunt eene lage plaats inneemt. Door deze zwemblaas te doen inkrimpen of uitzetten, en dus hun volume kleiner of grooter te maken, zonder hun gewigt te veranderen, kunnen zij hun ligchaam laten zakken of stijgen. Bij de menschen bestaat de zwemkunst in zekere vaardigheid om zich boven het water te houden. Daar doorgaans het menschelijk ligchaam een weinig ligter is dan water, zoo is het niet zoo zeer moeijelijk, om zich boven het water te houden, vooral als men den adem binnenhoudt, en dus het volume van zijn ligchaam grooter maakt, als wel om te zorgen, dat het hoofd boven water blijft, daar dit door zijne meerdere zwaarte juist eene lagere plaats tracht in te nemen, dan de andere deelen van het ligchaam.

66. **Bepaling van het soortelijk gewigt van vaste ligchamen en vloeistoffen door hydrostatische weging.** — Wij hebben boven (13) gezegd, dat men door soortelijk gewigt eener stof de verhouding verstaat tusschen het gewigt van een zeker volume dier stof, en dat van een even groot volume water, wanneer men namelijk het soortelijk gewigt van water als eenheid aanneemt. Eene juiste kennis van het volume van het ligchaam is dus tot zoodanige bepaling noodig. Het laat zich echter gemakkelijk inzien, dat zulks door meting onmogelijk met genoegzame naauwkeurigheid kan geschieden. De eigenschappen van ondergedompelde ligchamen bieden evenwel een middel aan, om zoodanige bepaling met groote naauwkeurigheid te doen. Immers een ligchaam, in water gewogen, verliest zooveel aan gewigt, als het verplaatste water weegt. Het gewigtsverlies is dus het gewigt van een volume water, even groot als het volume van het ligchaam; men vindt dus het soortelijk gewigt, door het gewigt van het ligchaam te deelen door het gewigtsverlies bij de weging in water.

Wil men zich tot zoodanige bepaling bedienen van de hydrostatische balans, in fig. 70 afgebeeld, dan hangt men onder aan de korte schaal B het ligchaam, welks soortelijk gewigt men bepalen wil, en zoekt zijn gewigt, door

op de schaal A gewigtjes te leggen. Daarna plaatst men onder de schaal B een glas met water, waarin men het ligchaam laat onderdompelen; het evenwigt is daardoor verbroken; men herstelt het door op de schaal B gewigten te plaatsen, die dan het gewigtsverlies of het gewigt van het verplaatste water aanduiden. Is het gewigt P, het gewigt in water P_1, dus het gewigtsverlies $P-P_1$, dan is het soortelijk gewigt,

$$S = \frac{P}{P-P_1}.$$

Vinden wij bijv., dat eene zilveren munt buiten het water 25 wigtjes weegt, en dat er, wanneer het onder water gedompeld wordt, nog 2.4 wigtjes op de schaal B gelegd moeten worden, dan is het soortelijk gewigt $\frac{25}{2.4}$ of 10.4.

Ook het soortelijk gewigt eener vloeistof kan door hydrostatische weging gevonden worden. Wanneer men namelijk een zelfde ligchaam achtervolgens in twee verschillende vloeistoffen weegt, dan zal het gewigtsverlies aanzienlijker wezen, naarmate de vloeistof grootere digtheid heeft. Is het gewigt van het voorwerp buiten het water P, in het water P_1, en in de vloeistof, waarvan men het soortelijk gewigt zoekt P_2, dan vindt men voor dit,

$$S = \frac{P-P_2}{P-P_1}.$$

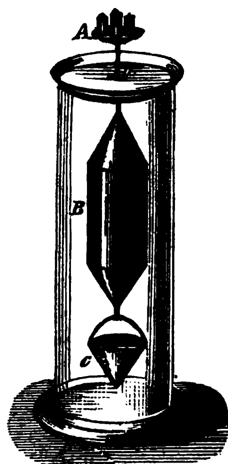
Hieruit volgt, dat men eigenlijk hiervoor het gewigt van het ligchaam zelf niet behoeft te kennen, doch slechts het gewigtsverlies, zoowel in water als in de andere vloeistof, heeft te bepalen. Men bedient zich gewoonlijk voor zoodanige bepaling van een massief glazen peervormig voorwerp, of ook wel van eene toegesmoltene, gedeeltelijk met kwikzilver gevulde glazen buis. Vindt men bijv. voor het gewigtsverlies van zoodanig voorwerp in water 5 wigtjes, in olijfolie 4.6, dan is het soortelijk gewigt van olijfolie $\frac{4.6}{5} = 0.92$.

Bij de hydrostatische weging behoort men naauwkeurig acht te geven op den warmtegraad der ligchamen en der vloeistoffen. Wij zullen later zien, dat de ligchamen alle, doch niet alle evenzeer, zich door de warmte uitzetten; hunne digtheid moet dus in dezelfde mate afnemen. Het water heeft zijne grootste digtheid bij eene temperatuur van nagenoeg 4° C., en het is bij die temperatuur, dat zijn soortelijk gewigt als eenheid wordt aangenomen; voor andere ligchamen bepaalt men het doorgaans voor eene temperatuur van 0°. Eene herleiding voor het verschil in warmte zal dus in de meeste gevallen, waar het op naauwkeurigheid aankomt, noodig zijn.

67. **Areometers.** — De bepaling van het soortelijk gewigt van vloeistoffen kan ook geschieden door middel van een bijzonder soort van werktuigen, die men *areometers* noemt, en wier gebruik eveneens op de wet van Archimedes berust. Het zijn toestellen van een bepaalden vorm, die in eene vloeistof gedeeltelijk inzinken; men onderscheidt ze in twee soorten: 1° areometers, welke men in verschillende vloeistoffen altijd even diep laat inzinken, door hun gewigt grooter te maken, wanneer de vloeistof grootere digtheid heeft; 2° areometers, wier gewigt geene verandering ondergaat, en dus dieper inzinken naarmate de vloeistof, waarin zij drijven, geringere digtheid heeft. De eerste soort noemt men daarom areometers met standvastig volume, de tweede soort areometers met standvastig gewigt.

Tot de areometers met standvastig volume behoort die van Nicholson (1787), in fig. 72 afgebeeld. B is een holle cilinder met twee kegels aan de uiteinden, die doorgaans van dun koperblik vervaardigd is. Bovenaan bevindt zich een dun staafje met een schaaltje A, en onderaan hangt aan een hengsel een omgekeerde kegel, gedeeltelijk met lood opgevuld, ten einde den geheelen toestel, als hij in eene vloeistof gedompeld wordt, overeind te doen blijven. Dezen areometer plaatst men in water, en legt op het schaaltje zooveel gewigten, tot hij inzakt tot aan een streepje, dat op het staafje bij *o* aangeteekend is. Zij P het gewigt van den areometer, en p de daarop geplaatste gewigten, om hem in water tot het streepje te doen inzakken, dan is $P + p$ het gewigt van het water, dat door den areometer verplaatst is. Vervolgens dompelt men hem in eene andere vloeistof, wier soortelijk gewigt men bepalen wil, en plaatst wederom gewigten p_1 op het schaaltje, tot het punt *o* met de oppervlakte van de vloeistof gelijk komt. De nu verplaatste vochtmassa weegt dus $P + p_1$, en daar het volume der vochtmassa in beide gevallen even groot is, zal het soortelijk gewigt der laatste vloeistof door het quotient $\frac{P + p_1}{P + p}$ aangeduid worden. Men zal ligt inzien, dat de areometer tot des te juister uitkomsten zal leiden, naarmate het staafje dunner is; want dan zal men met grootere naauwkeurigheid de gewigten kunnen bepalen, die op het schaaltje moeten gelegd worden, om het juist tot het streepje bij *o* te doen inzakken.

Fig. 72.



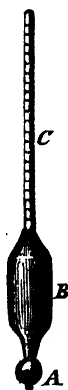
Men kan zich van den areometer van Nicholson ook bedienen, om het soortelijk gewigt van vaste ligchamen te bepalen; men behoeft daartoe niet eens het gewigt van den areometer zelven te kennen. Te dien einde plaatst men hem eerst in water, en legt zooveel gewigt op het schaaltje, dat het punt *o* gelijk komt met den waterspiegel. Stellen wij, dat hiertoe een gewigt P_1 vereischt wordt. Vervolgens vervangt men dit gewigt door het ligchaam, waarvan men het soortelijk gewigt zoekt, en voegt er andermaal gewigten bij, tot het punt *o* met den waterspiegel gelijk komt. Indien daartoe een gewigt P_2 noodig is, dan bedraagt het gewigt van het ligchaam $P_1 - P_2$. Nu neemt men dit van het schaaltje weg, en plaatst het onder op het bakje C, zorg dragende dat bij de indompeling geene luchtbellen aan den areometer of aan het ligchaam blijven kleven. De toestel zal nu minder wegen, dan toen het ligchaam op het schaaltje geplaatst was; het verschil zal juist het gewigt zijn van het water, welks plaats door het ligchaam ingenomen is. Bepaalt men dus ook dit, door op het schaaltje zooveel gewigt te leggen, tot het punt *o* wederom gelijk komt met den waterspiegel, en vindt men daarvoor p, dan zal $\frac{P_1 - P_2}{p}$ het soortelijk gewigt zijn. Heeft het ligchaam geringer soortelijk gewigt dan water, dan geschiedt alles op dezelfde wijze; de areometer behoort dan echter van onderen met een zeefje van metaaldraad voorzien te zijn, waardoor het ligchaam belet wordt zich opwaarts te bewegen.

Moet men bijv. het soortelijk gewigt van marmer bepalen, dan plaatst men eerst op den areometer zooveel gewigten, tot hij tot het streepje inzakt. Laat hiertoe 25 wigtjes noodig zijn. Nu legt men een stukje marmer op het schaaltje, en bevindt, dat men 12 wigtjes bij moet voegen, om het weder tot het punt *o* te doen indompelen. Het gewigt van het marmer bedraagt dus 13 wigtjes. Het stukje wordt nu onderop bij C gelegd; om nu echter den areometer weder in denzelfden stand te brengen, moet men er nog 4.55 wigtjes bijvoegen. Het soortelijk gewigt van het marmer zal dus $\frac{13}{4.55} = 2.85$ wegen. Had men een stukje kurk genomen, voor welks gewigt men 1.5 wigtjes gevonden had, dan zoude men bevonden hebben, dat men, om den areometer met het stuk kurk bij C te doen inzakken, op het schaaltje nog een gewigt van 6.2 wigtjes moet plaatsen; voor het soortelijk gewigt van kurk had men dan gevonden $\frac{1.5}{6.2} = 0.24$.

Fahrenheit heeft een dergelijken areometer met standvastig volume uit glas vervaardigd, omdat koper door verschillende vloeistoffen aangetast wordt. Hij heeft het onderste bakje C, dat voor de bepaling van de digtheid van vloeistoffen niet noodig is, vervangen door een glazen bolletje met kwik gevuld.

Deze soort is echter voor de bepaling der digtheid van vloeistoffen minder gemakkelijk, dan de areometers van een onveranderlijk gewigt. De vorm van deze is doorgaans die van fig. 73. Zij zijn geheel van glas vervaardigd en hol; onderin bij A bevindt zich een weinig kwikzilver of eenige hagelkorrels, B is bij sommige cilindervormig, bij andere bolvormig, terwijl op de buis C, die van boven toegesmolten is, verdeelingen zijn aangebragt, hetzij op de buis zelve, hetzij op eene papieren schaal, die er in bevestigd is.

Fig. 73.



De eenvoudigste van deze soort van areometers is die van Gay-Lussac, die gewoonlijk *volumeter* genoemd wordt. Bij het punt, tot hetwelk hij in zuiver water zakt, is het cijfer 100 geplaatst; boven en beneden dit zijn verdeelingen aangebragt, op zoodanigen afstand van elkander, dat het gedeelte der buis, tusschen twee verdeelingen begrepen, $\frac{1}{100}$ bedraagt van het ingedompelde volume. Daar de getallen dan het volume van het ingedompelde gedeelte aanwijzen, en de digtheden zich omgekeerd verhouden als die volumen, vindt men door eene eenvoudige deeling het soortelijk gewigt. Het cijfer 120 duidt dus een soortelijk gewigt van $\frac{100}{120} = 0.83$ aan; dat van 75 een soortelijk gewigt van $\frac{100}{75} = 1.33$. Deze areometer zal alleen dan naauwkeurige resultaten geven als de verdeelingen groot zijn; hij wordt dan echter door zijne lengte lastig in het gebruik. Men gebruikt er daarom gewoonlijk twee; de eene heeft het cijfer 100 boven aan, en daaronder de kleinere getallen, en dient voor vochten, zwaarder dan water; bij den anderen is het cijfer 100 digt bij den bol B geplaatst, en daarboven de grootere getallen, zoodat deze alleen voor ligtere vochten bruikbaar is. Men kan ook in plaats van de cijfers terstond de daarbij behoorende soortelijke gewigten op de schaal aanwijzen; de areometer geeft dan onmiddelijk de digtheid aan.

Men heeft voor den areometer met onveranderlijk gewigt nog andere schalen gemaakt, wanneer hij namelijk voor eene bepaalde soort van vloeistoffen gebruikt wordt. De voornaamste van deze is die van Beaumé, bij welken het punt, tot hetwelk de areometer in zuiver water inzakt, als nulpunt is aangenomen, terwijl bij dat, tot welk hij inzakt in eene oplossing van 15 deelen keukenzout in 85 deelen water (dus eene oplossing die 15 ten honderd zout bevat), het cijfer 15 geplaatst wordt. De afstand tusschen deze beide vaste punten wordt in 15 deelen verdeeld, die men graden noemt. Over de geheele lengte der buis tot aan den bol worden even groote verdeelingen aan-

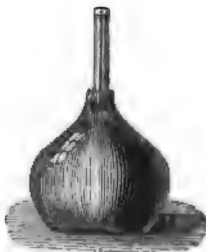
gebragt. Hij is bovendien zoo ingerigt, dat het nulpunt bovenaan komt te liggen, zoodat hij alleen geschikt is voor vloeistoffen, zwaarder dan water. Met zulk eenen areometer vindt men, dat gewoon zoutzuur 26° aanwijst, salpeterzuur 36°, en sterk zwavelzuur 66°.

Van den areometer van Beaumé maakt men ook gebruik om het alcoholgehalte van geestrijke vochten te bepalen, in welk geval men hem *alcoholmeter* noemt; de verdeeling is dan geheel anders ingerigt. Voor nulpunt neemt Beaumé dan het punt, tot welk de areometer inzakt in eene oplossing, die 10 ten honderd keukenzout bevat, terwijl men bij het punt, bij hetwelk hij in zuiver water staan blijft, het cijfer 10 plaatst, en verder naar boven even groote verdeelingen aanbrengt. Het nulpunt is dus bij den alcoholmeter een ander, dan bij den areometer voor zwaardere vloeistoffen, en ook de graden zijn niet even groot. Voor geestrijke vochten heeft men slechts de graden van 10 tot 40 noodig.

Gay-Lussac heeft de verdeelingen van den alcoholmeter van Beaumé zoodanig gewijzigd, dat hij terstond aanwijst, hoeveel ten honderd zuivere watervrije alcohol in de vloeistof bevat is. In watervrijen alcohol wijst die areometer 100 aan, in water 0, en in mengsels, hoeveel procent zuivere alcohol zich in de vloeistof bevindt. Wijst de areometer bijv. 46 aan, dan houdt de vloeistof 46 deelen alcohol en 54 deelen water. Bij de in ons land voorgeschrevene areometers worden de verdeelingen half zoo groot genomen; spiritus van 140, bevat dus 70 procent watervrijen alcohol. Bij al deze aanwijzingen moet echter rekenschap gehouden worden van den warmtegraad der vloeistof, daar de aanwijzing geschiedt in de onderstelling, dat de temperatuur 15° bedraagt. Is deze verschillend, dan moet daarvoor eene correctie aangebragt worden, die men in daartoe opzettelijk berekende tafels vindt.

68. **Bepaling van het soortelijk gewigt door een fleschje.** — Behalve de beschrevene methoden, om het soortelijk gewigt van vaste ligchamen of vloeistoffen te bepalen, moeten wij nog eene zeer eenvoudige methode vermelden, die echter niet berust op de wet van Archimedes.

Fig. 74.



Men heeft een klein fleschje (Fig. 74) met een naauw sluitend, eenigzins kegelvormig afgeslepen stopje, dat met eene zeer fijne opening doorboord is. Dit fleschje wordt eerst ledig gewogen, en daarna gevuld met water. Om het volkomen te vullen, giete men het tot den rand toe vol, en plaatse er dan het stopje

op; het overvloedige water zal dan op zijde van het stopje ontwijken en ook door de fijne opening. Gewoonlijk zal bovenaan een druppel blijven zitten, dien men daar afveegt. Vervolgens wordt het fleschje met eene andere vloeistof gevuld en gewogen. Aldus heeft men de gewigten van een bepaald volume der vloeistof en van een gelijk volume water bepaald; het quotient zal dus het soortelijk gewigt aanduiden. Deze methode leidt tot zeer juiste resultaten; Regnault heeft er zich van bediend, om het soortelijk gewigt van kwikzilver met groote naauwkeurigheid te bepalen.

Men kan het fleschje ook gebruiken om de digtheid van poeders of andere ligchamen, waarvan men slechts kleine stukjes ter zijner beschikking heeft, te bepalen; te dien einde bepaalt men eerst het gewigt P van het ligchaam en plaatst het daarna naast het met water gevulde fleschje op de balans, en maakt evenwigt; daarna doet men het ligchaam in het fleschje, waardoor een even groot volume water uitgedreven wordt; het evenwigt is dan verbroken, en men zal een gewigt p moeten bijvoegen, om het te herstellen. Dit is dan het gewigt van het water, waarvan het ligchaam de plaats inneemt, en het quotient $\frac{P}{p}$ zal dus het soortelijk gewigt aanwijzen.

Moet men de digtheid bepalen van stoffen, die in water oplosbaar zijn, of daardoor aangetast worden, dan gebruikt men eene andere vloeistof, bijv. alcohol of ether. De verkregene uitkomst duidt dan het soortelijk gewigt aan, als dat van de gebruikte vloeistof als eenheid wordt aangenomen; men moet dat dan nog met dat van die vloeistof vermenigvuldigen, om de digtheid ten opzigte van water te verkrijgen.

69. Soortelijk gewigt van eenige vaste ligchamen en vloeistoffen bij 0°, dat van water bij 4° als eenheid aannemende.

Vaste ligchamen.

Platina (gesmeed)	22.069	Tin	7.291
Goud (gesmeed)	19.362	Aluminium	2.560
Lood	11.350	Magnesium	1.743
Zilver	10.474	Sodium	0.997
Bismuth	9.822	Kalium	0.865
Koper.	8.850	Diamant	3.520
Geelkoper	8.383	Zwavel	2.086
Staal	7.816	Phosphorus	1.770
IJzer in staven	7.788	Rotskristal	2.653
IJzer (gegoten)	7.207	Flintglas (engelsch)	3.329

Vaste ligchamen. (Vervolg.)

Spiegelglas	2.370	Eikenhout	1.170
IJs	0.930	Dennenhout.	0.657
Steenkool	1.329	Populierhout	0.389
Ebbenhout	1.330	Kurk	0.240

Vloeistoffen.

Kwikzilver	13.596	Olijfolie	0.915
Zwavelzuur.	1.841	Naphta	0.847
Salpeterzuur	1.220	Alcohol	0.792
Zoutzuur.	1.208	Zwavelether	0.715

B. HYDRODYNAMICA.

70. **Snelheid van uitvloeijing van vloeistoffen, wet van Torricelli.** — Wanneer in den wand van een vat, waarin zich eene vloeistof bevindt, eene opening gemaakt wordt, dan zal die vloeistof er uit vloeijen, want de deeltjes, die vroeger tegen den wand eene zekere drukking uitoefenden, worden, indien dat gedeelte van den wand is weggenomen, niet meer tegengehouden; het evenwigt is verbroken, en er ontstaat dus beweging. De snelheid dezer beweging, veroorzaakt door de drukking der vochtdeeltjes, zal aanzienlijker wezen, als die deeltjes op elkander eene grootere drukking uitoefenen, dat is, wanneer de opening zich dieper beneden den waterspiegel bevindt. Gaan wij na, welke betrekking er bestaat tusschen de hoogte van de vloeistof boven de opening, en de snelheid waarmede deze uitvloeit.

Beschouwen wij te dien einde een vat (Fig. 75), in welks bodem eene opening cd is gemaakt, en dat tot p met eene vloeistof is gevuld. Wanneer het kleine laagje $abdc$, dat zich boven de opening bevindt, enkel door zijn eigen gewigt viel, dan zoude het, als het de opening verliet, de snelheid verkregen hebben van een vrijvallend ligchaam, dat van a tot c gevallen is; als dus $ac = h'$ gesteld wordt, zoude deze snelheid door de formule $\sqrt{2gh'}$ uitgedrukt worden (44). Maar de vochtdeeltjes in $abdc$ zijn niet alleen door hun eigen gewigt gevallen, maar door de drukking, welke de geheele kolom $pqcd$ veroorzaakt; de kracht, die oorzaak van deze beweging is, zal dus evenveel maal grooter zijn, als ac in pc begrepen is; de waarde van g moet dus evenveel maal grooter genomen, en dus, als $pc = h$

Fig. 75.

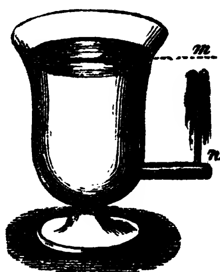


gesteld wordt, door $\frac{h}{h'} . g$ vervangen worden. De snelheid van uitvloeijing wordt dus $v = \sqrt{2 . \frac{h}{h'} . g . h'} = \sqrt{2gh}$. Zij is dus even groot als die van een ligchaam, dat vrij gevallen is van eene hoogte, gelijk aan die van den waterspiegel boven de opening; even als deze is zij dus evenredig aan den vierkantswortel uit die hoogte. Men is gewoon de snelheid, even als bij den val der ligchamen, uit te drukken door den weg, door elk waterdeeltje in ééne seconde afgelegd. Kent men nu ook de grootte der opening, dan kan men de hoeveelheid vocht, die in eene seconde uitvloeit, berekenen; zij wordt, als a de vlakte-inhoud der opening is, uitgedrukt door het produkt $av = a\sqrt{2gh}$. Het spreekt van zelf, dat a en v in dezelfde maat moeten worden uitgedrukt.

De hier aangetoonde wet, naar haren ontdekker de wet van Torricelli (1643) genoemd, leert ons, dat de snelheid van uitvloeijing onafhankelijk is van digtheid der vloeistof. Wel is de drukking, die de deeltjes bij de opening ondervinden, aanzienlijker, als de vloeistof soortelijk zwaarder is, maar die deeltjes zelven zijn evenveel maal zwaarder, en er is dus ook eene grootere kracht noodig, om ze eene zelfde snelheid te geven, als de ligtere.

Wij hebben vroeger (61) de opmerking gemaakt, dat de drukking der vochtdeeltjes altijd loodregt op den wand gerigt is; bij het verlaten van het vat zullen zij dus ook die rigting volgen. Op de snelheid van de beweging, alsmede op de hoeveelheid vocht die uit het vat vloeit, zal de rigting van den wand echter geen invloed uitoefenen, daar de drukking in eene zelfde horizontale laag in alle rigtingen dezelfde is. Bevindt zich de opening in den bodem, dan zal de uitstroomende waterstraal vertikaal naar beneden gerigt wezen. Is de opening in den zijwand gemaakt, dan bevinden de vochtdeeltjes zich in hetzelfde geval als een ligchaam, dat in eene horizontale of in eene schuine rigting wordt voortgeworpen, doch waarop tevens de zwaartekracht blijft werken; zij zullen (49) parabolen beschrijven, en de straal zal dus ook zoodanigen vorm aannemen. Heeft men aan het vat eene buis bevestigd, zooals in fig. 76, dan zal de straal uit n vertikaal naar boven springen; de deeltjes zouden dus ten gevolge van de snelheid, die zij bij de opening hebben, moeten opklimmen tot een punt m, even hoog gelegen als de waterspiegel in het vat, indien er niet, zooals wij weldra zien zullen, oorzaken aanwezig waren, welke dit onmogelijk maken.

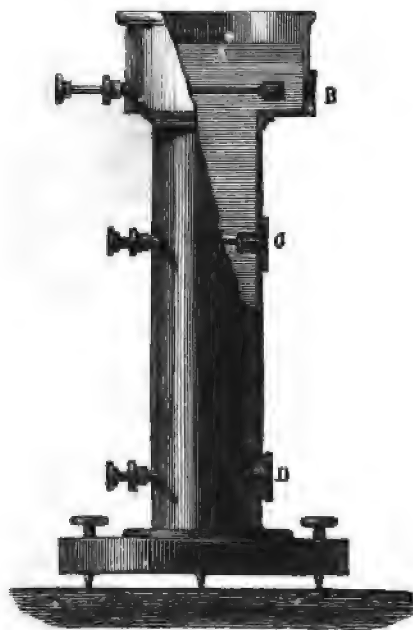
Fig. 76.



Wanneer op de oppervlakte van de vloeistof eene drukking wordt uitgeoefend, hetzij door de lucht zamen te persen, hetzij door andere mechanische middelen, dan zal deze zich gelijkelijk aan alle deeltjes mededeelen, en dus op de snelheid van invloed zijn. Om dien invloed te berekenen moet men nagaan, hoe groot eene kolom van dezelfde vloeistof zoude moeten zijn, om die drukking te veroorzaken. Wanneer bijv. het water in een vat 0.9 el boven de opening staat, dan zal volgens de formule de uitstroomingssnelheid 4.2 el zijn. Wordt nu bovendien op de oppervlakte eene drukking van 0.4 pond op elke vierkante duim uitgeoefend, dan is dit hetzelfde, als of er eene waterkolom van 4 el op geplaatst was. In de formule moet men dus voor h nemen 4.9 el, zoodat men dan voor de snelheid 9.8 el vindt.

71. **Proeven tot bewijs van de wet van Torricelli.** — De snelheid der waterdeeltjes, die uit eene opening vloeijen, laat zich moeijelijk onmiddelijk bepalen. Gemakkelijker geschiedt zulks door de hoeveelheid vocht te meten, die in een bepaalden tijd uit eene opening van bekende afmetingen gestroomd is. Het is daartoe echter noodig, dat de hoogte der vochtkolom boven de opening gedurende den tijd, dat de proef duurt, dezelfde blijft. Men moet dus zorg dragen, dat zulks steeds het geval is met het vat, dat men tot de proefneming gebruikt. Men kan zich daartoe bedienen van een vat, zoo als in fig. 77 is afgebeeld, van zinkblik vervaardigd en minstens eene el hoog. Om den waterspiegel op dezelfde hoogte te houden laat men uit een ander vat boven in water stroomen, terwijl het overtollige water door eene bij A aangebragte buis wegloopt. In B, C, D zijn drie openingen, welke van binnen gesloten worden door stop

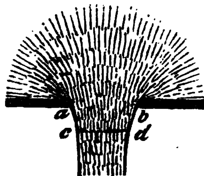
Fig. 77.



pen van caoutchouc, die er door middel van een steel, die door den tegenovergestelden wand gaat, sterk tegen aan gedrukt kunnen worden. De drie openingen zijn zoodanig genomen, dat de afstanden van B, C en D tot den waterspiegel zich verhouden als de getallen 1, 4 en 9, zoodat de snelheden zich moeten verhouden als 1, 2 en 3. Men kan er verschillende stukken inschroeven, waarin zich openingen van onderscheidene grootte of vorm bevinden; men moet echter daarbij steeds zorgen, dat die openingen in dunne plaatjes gemaakt zijn, daar de hoeveelheid vocht, die door eene opening in eenen dikken wand uitvloeit, zoo als wij later zien zullen, niet volkomen dezelfde is. De stralen, uit B, C en D uitvloeijende, zullen eenen verschillenden vorm hebben. Bij B is de drukhoogte gering, en dus ook de snelheid. De straal, die aldaar uitvloeit, zal zich dus weinig van het vat verwijderen. Bij C, waar de snelheid tweemaal grooter is, zullen de deeltjes zich verder van den wand verwijderen, en bij D zal de vorm der parabool weder eene andere zijn. Men kan van denzelfden toestel gebruik maken tot proeven aangaande een vertikalen waterstraal, door aan eene der openingen een stuk te bevestigen, waarin de opening in den boven- of benedenwand is aangebragt.

72. **Zamentrekking van den straal bij de opening.** — Wanneer de proeven aangaande de hoeveelheden water, die door de openingen B, C, D uitvloeijen, met naauwkeurigheid gedaan worden, dan zal men bevinden, dat zij eene volkomene bevestiging geven van de wet, dat de snelheden evenredig zijn aan de vierkantswortels uit de hoogten. Beschouwt men echter elke proef op zich zelve, dan bevindt men, dat de hoeveelheid niet die is, welke door de formule wordt aangewezen, maar steeds geringer is, en overeenkomt met de formule $0.62\, a \sqrt{2gh}$. Eene naauwkeurige waarneming van den vorm van den straal, die uit eene cirkelvormige opening vloeit, is voldoende om de oorzaak van deze vermindering aan te wijzen. Men bevindt namelijk dat de straal, wanneer hij uit de opening komt, niet volkomen cilindrisch is, maar dat de middellijn afneemt tot op een afstand, gelijk aan de helft van de middellijn der opening. Fig. 78 stelt dit verschijnsel voor, waaraan men den naam geeft van de *zamentrekking* of *contractie* van den straal; *cd* is volgens naauwkeurige metingen 0.8 van *ab*. Van daar af behoudt de straal over eene meerdere of mindere uitgebreidheid hare cilindrische gedaante.

Fig. 78.



De oorzaak van de zamentrekking van den straal moet in de beweging van de vochtdeeltjes gezocht worden. Vooreerst komen zij van alle kanten naar

de opening *ab*; zij moeten dus daar tegen elkander stooten, waardoor niet alleen de rigting hunner beweging veranderd, maar ook de snelheid verminderd, wordt. Bovendien zullen de deeltjes, welke langs de kanten der opening heen strijken, door de wrijving eenigen wederstand ondervinden, terwijl die, welke zich in het midden van den straal bevinden, hunne snelheid behouden. De deeltjes, die op hetzelfde oogenblik door de opening *ab* gaan, komen dus niet te gelijker tijd bij *cd* aan. Daar de straal voorbij *cd* echter geene zamentrekking meer ondergaat, kan men de beweging der deeltjes in *cd* als eene regelmatige en voor alle even schielijke beschouwen. Is de opening groot, dan zal de invloed van de wrijving tegen de kanten zich minder kunnen doen gevoelen; de zamentrekking moet dus in dat geval geringer zijn, zooals ook inderdaad door proefnemingen bevestigd is.

Uit de waarneming, dat de middellijn *cd* slechts 0.8 van die der opening is, volgt, dat de doorsnede van den straal in het punt der sterkste zamentrekking 0.64 van de opening bedraagt. Stroomde dus de vloeistof met eene snelheid $v = \sqrt{2gh}$ door eene opening, even groot als die doorsnede, dan zoude de hoeveelheid $0.64\, a \sqrt{2gh}$ bedragen, welke slechts weinig verschilt van die, welke door de opening *ab* stroomt, en waarvoor wij $0.62\, a \sqrt{2gh}$ gevonden hebben. Hieruit volgt dus, dat men het kan beschouwen, alsof de vochtdeeltjes in het punt van de sterkste zamentrekking inderdaad nagenoeg de snelheid v hebben, die door de theorie wordt aangewezen, en daarom ook de *theoretische* snelheid genoemd wordt. Men zoude dus de werkelijke hoeveelheid kunnen vinden, door in plaats van de opening *ab* de doorsnede *cd* te nemen; men is echter gewoon bij de berekening de grootte der opening onveranderd te nemen, en in plaats van de theoretische snelheid v eene snelheid $0.62\, v$ aan te nemen, aan welke men den naam van *werkelijke* snelheid van uitvloeijing geeft.

73. **Gedaante van den straal.** — Wij hebben gezegd, dat de straal, die uit eene kleine cirkelvormige opening stroomt, voorbij het punt der sterkste zamentrekking cilindrisch blijft. Wanneer men echter uit eene zoodanige opening in eenen horizontalen wand eenen waterstraal vertikaal naar beneden vloeijen laat, bemerkt men, dat de cilindrische gedaante zich slechts over een gedeelte uitstrekt, terwijl zich verder verbreedingen en vernaauwingen, of zoo als men ze veelal noemt, *buiken* en *knoopen* vertoonen, zooals in fig. 79 is aangeduid. Naauwkeurige waarnemingen, door Savart (1833) in het werk gesteld, hebben doen zien, dat het gedeelte AB, dat doorschijnend is, eene zwak kegelvormige gedaante heeft, zoodat de middellijn bij B een weinig kleiner is dan die in het punt van de zamentrekking, terwijl de verbreedin-

gen en vernaauwingen in het onderste gedeelte, dat zich troebel voordoet, bestaan uit eene menigte groote druppels, door kleinere afgewisseld, zooals in fig. 80 is aangewezen. Men kan zich hiervan overtuigen, door den straal slechts een uiterst klein oogenblik, bijv. door eene electrische vonk, te verlichten; men kan dan de druppels onderscheiden, en zich dus overtuigen, dat alleen door de schielijke opeenvolging van deze op het oog een indruk gemaakt wordt, zooals fig. 79 voorstelt. De reden, waarom de straal in afzonderlijke druppels overgaat, zullen wij later trachten aan te wijzen, als wij de moleculaire werkingen tusschen de vochtdeeltjes zullen hebben leeren kennen. Dat het gedeelte AB geen zuivere cilinder kan wezen, maar bij B naauwer moet zijn dan bij A, is een onmiddelijk gevolg van de werking der zwaartekracht, door welke de deeltjes in B eene snellere beweging hebben dan die, welke zich op hetzelfde oogenblik bij A bevinden. De afstand van twee deeltjes, die in twee achtervolgende oogenblikken door de opening gevloeid zijn, zal des te grooter worden, naarmate zij zich verder van de opening verwijderen, en de straal moet daardoor eenigzins eene kegelvormige gedaante verkrijgen. Het verschil in snelheid is echter voor het doorschijnende gedeelte van den straal nog gering, zoodat dan ook de afwijking van den zuiver cilindrischen vorm alleen bij zeer naauwkeurige waarneming merkbaar is.

Fig. 79. Fig. 80.

Even als een vertikaal naar boven gerigte waterstraal eene geringe vernaauwing ondergaat, zal ook een vertikaal naar boven gespoten straal eene verbreeding ondergaan. Bij een zoodanigen is eveneens het eerste gedeelte doorschijnend, het volgende troebel. De buiken en knoopen vormen zich ook hier, ofschoon niet zoo duidelijk als bij den naar beneden gerigten. Bij een straal, uit eene opening in een vertikalen of schuinen wand voortkomende, worden dezelfde verschijnselen waargenomen, hoewel hij dan door de werking der zwaartekracht de gedaante van eene parabool aanneemt. Dat in geen dezer gevallen de lucht invloed uitoefent op de verschijnselen, blijkt daaruit, dat zij zich in het luchtledige eveneens voordoen.

Heeft de opening eene andere dan eene cirkelvormige gedaante, dan zal de vorm van den straal ook verschillend zijn. Ons bestek laat evenwel niet toe hieromtrent in bijzonderheden te treden.

Bij een vertikaal naar boven gerigten straal zullen de neërvallende druppels de opgaande in hunne beweging belemmeren, en dus veroorzaken, dat de

straal niet zoo hoog komt, als volgens de wet van Torricelli zoude moeten geschieden; de tegenstand, dien de vochtdeeltjes aan de opening ondervinden, werkt ook vertragend, zoodat het onmogelijk is den straal alleen door de hydrostatische drukking even hoog te laten opspringen, als de vloeistof binnen in het vat staat. Onder de gunstigste omstandigheden zal de hoogte van den straal 0.9 van die van den waterspiegel bedragen. Men kan zich van den invloed der nedervallende waterdeeltjes overtuigen, door aan den waterstraal eerst eene volkomen vertikale en daarna eene slechts weinig daarvan verschillende rigting te geven. In het tweede geval, wanneer de neêrvallende druppels ter zijde vallen, zal de straal een weinig hooger komen. Als men de opening, waaruit een vertikale straal springen moet, plotseling opent, zal men ook bevinden, dat de straal in het eerste oogenblik een weinig hooger springt; dit komt eenvoudig daarvan, dat er dan nog geene neêrvallende deeltjes zijn.

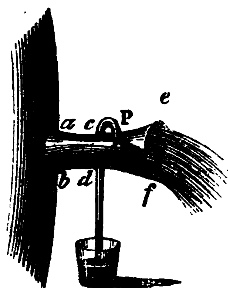
74. **Uitvloeijing door pijpen.** — De toevoeging van eene pijp of tuit aan de opening, waardoor eene vloeistof uit een vat stroomt, oefent eenen aanmerkelijken invloed op de snelheid en op de uitvloeijende hoeveelheid uit. Heeft deze buis denzelfden vorm als de waterstraal, en dus eene eindopening even groot als de doorsnede van den straal in het punt zijner grootste zamentrekking, dan zal deze geenen invloed op de snelheid uitoefenen. De hoeveelheid zal dan nagenoeg die zijn, welke volgens de theorie uit deze buitenste opening zal stroomen; alleen de wrijving tegen de wanden zal eenige vertraging veroorzaken.

Is de opening met eene cilindrische pijp voorzien, ongeveer drie- of viermaal langer dan de middellijn der opening, dan kunnen er twee gevallen plaats hebben; òf de straal vult de geheele pijp en bevochtigt de binnenwanden, òf terstond bij het stroomen door de binnenste opening heeft er eene zamentrekking plaats, en de wanden van de pijp komen niet met het vocht in aanraking. In dit laatste geval zal de hoeveelheid klaarblijkelijk dezelfde moeten zijn, als wanneer het vocht door eene opening in een dunnen wand vloeit; in het eerste daarentegen zal zij grooter wezen, en volgens de waarnemingen ongeveer 0.84 van de theoretische. De ondervinding leert ook, dat, wanneer de drukking gering is, de straal den binnenwand bevochtigt, terwijl hij bij eene aanzienlijke drukking doorgaans daarmede niet in aanraking is.

Kegelvormige pijpen oefenen nog grooteren invloed uit op de hoeveelheid vocht. Gebruikt men eene kegelvormige tuit, waarvan het eerste gedeelte *abcd* (Fig. 81) den vorm heeft van den zamengetrokkenen straal, terwijl het daarop volgende gedeelte *cdef* wijd uitloopt, dan kan de hoeveelheid

vocht zelfs 2.5 maal meer bedragen dan die, welke door eene opening *cd* zonder tuit zoude stroomen, en dus ruim anderhalf maal de theoretische.

Fig. 81.



De oorzaak van de vermeerdering der hoeveelheid vocht door middel van tuiten laat zich op de volgende wijze verklaren. Het gedeelte *cdef* vult zich geheel met water, zoodat de snelheid van alle vochtdeeltjes in de opening *ef* nagenoeg even groot is, als die der deeltjes in de opening *cd* zoude moeten zijn. Bij P zoude er dus, indien zulks mogelijk was, eene ledige ruimte ontstaan, hetgeen echter niet geschieden kan, wanneer de straal eens de geheele pijp vult. Dat er echter inderdaad eene zuiging plaats heeft, daarvan kan men zich overtuigen, door aan de pijp in P eene omgebogene glazen buis te bevestigen, wier onderste uiteinde in een glas met water of kwikzilver dompelt. Dit zal, als het water door de pijp *abef* stroomt, in die buis stijgen.

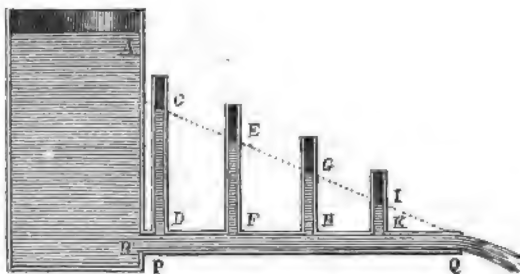
Hetgeen hier is opgemerkt omtrent den invloed, welken de vorm der uitlooppijpen op de snelheid van uitvloeijing uitoefent, doet tevens zien, dat het niet onverschillig is, of eene opening in een vat in een dunnen of in een dikken wand gemaakt is. In het laatste geval toch zullen de omstandigheden volkomen dezelfde zijn, als wanneer het door eene pijp uitstroomt.

75. **Beweging van vloeistoffen in lange buizen.** — Wanneer water door eene lange cilindrische buis vloeit, dan zullen de deeltjes door de wrijving tegen de wanden der buis eenen zekeren tegenstand ondervinden en dus met geringere snelheid uitstroomen, dan wanneer de buis wordt achterwege gelaten. Men kan zich gemakkelijk hiervan overtuigen, door aan een der openingen van den waterbak (Fig. 77) eene lange glazen buis in horizontalen stand te bevestigen. Men zal dan tevens bevinden, dat de vermindering in snelheid aanzienlijker zal zijn, wanneer de buis naauw is; alsmede dat zij, zooals te verwachten was, toeneemt met de lengte der buis en met de snelheid van het vocht. Is de buis niet horizontaal geplaatst, zoodat de vochtdeeltjes niet alleen door de hydrostatische drukking in het vat uitstroomen, maar ook door hunne zwaarte als 't ware langs een hellend vlak afglijden, dan zal men ook hiervan rekenschap moeten houden.

Het gedeelte der snelheid, dat door de wrijving van de vochtdeeltjes tegen den wand der buis als snelheid is verloren gegaan, kan evenwel niet zonder uitwerking gebleven zijn. Terwijl bij korte buizen, welke geene

vermindering van snelheid bewerken, de vloeistof ook geene drukking op de wanden uitoefent, en zelfs bij sommige het tegenovergestelde, namelijk eene zuiging plaats heeft, zoo mag men verwachten, dat bij zeer lange buizen wel eene drukking op de wanden wordt uitgeoefend. Stellen wij, om dit met een voorbeeld op te helderen, dat de vermindering in snelheid $\frac{1}{3}$ bedraagt, zoodat de vloeistof uit het uiteinde der buis uitstroomt met eene snelheid, die slechts $\frac{2}{3}$ der theoretische bedraagt. Daar de snelheid overal in de buis dezelfde moet zijn, zal zij bij het begin van de buis ook slechts $\frac{2}{3}v$ bedragen. Deze snelheid nu wordt veroorzaakt door eene waterkolom, die in plaats van h slechts $\frac{4}{9}h$ bedraagt. De drukking van $\frac{5}{9}h$ geeft dus geene snelheid, maar wordt verbruikt om de wrijving te overwinnen. Men kan zich hiervan proefondervindelijk overtuigen, door aan de buis PQ (Fig. 82) eene vertikale glazen buis CD te bevestigen. Het water zal in deze stijgen en op eene hoogte blijven staan gelijk aan $\frac{5}{9}$ AB. Heeft men nog meerdere buizen EF, GH, IK met de buis PQ verbonden, dan zal men bevinden, dat ook in deze het water klimt, doch tot geringere hoogte, naarmate men Q nadert, en dat de punten E, G, I alle gelegen zijn in de regte lijn, die C met Q verbindt. De reden hiervan laat zich gemakkelijk inzien. De drukking in CD is noodig om de wrijving in de geheele buis PQ te overwinnen. In H, op de helft van DQ gelegen, zal de helft der hydrostatische drukking door CD aangewezen, als 't ware reeds verbruikt zijn, om de wrijving in DH te overwinnen, terwijl de andere helft, door de kolom GH voorgesteld, voldoende zal zijn om die in HQ te overwinnen. Voor de tusschen gelegene punten F, K geldt eene gelijke redenering.

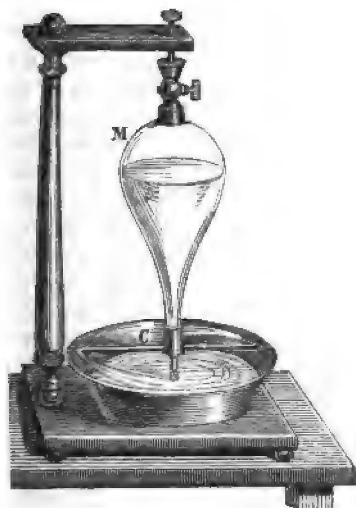
Fig. 82.



Wanneer zich in de buis vernaauwingen of bogten bevinden, zoodat de rigting of snelheid der waterdeeltjes eene plotselinge verandering ondergaat, dan zal de weêrstand en dus ook het verlies aan snelheid aanzienlijker wezen. Gebruikt men dus buizen voor waterleidingen, waarbij men eene aanzienlijke snelheid van uitvloeijing verlangt, zoo als bijv. bij het aanleggen van fonteinen, dan moet men sterke bogten trachten te vermijden, en zorg dragen, dat de buizen overal gelijke en zoo groot mogelijke middellijn hebben.

76. **Reactie bij het uitvloeijen van vloeistoffen.** — Bij een met eene vloeistof gevuld vat zullen de even hoog gelegene gedeelten der vertikale wanden eene gelijke drukking ondergaan (61). Maakt men echter in een dier wanden eene opening, waardoor het water uitstroomt, dan zal daardoor de drukking op dat gedeelte vàn dien wand onmogelijk zijn. De drukking op den tegenovergestelden wand, die evenwigt maakte met die op het nu weggenomene gedeelte, is echter blijven bestaan; het evenwigt is dus verbroken, en het geheele vat zal trachten eene beweging aan te nemen in de rigting van die drukking. Het is dus schijnbaar eene terugwerkende krachtsuiting door de uitstroomende vloeistof, en daarom noemt men ze de *reactie* van den uitstroomenden straal. Men kan deze werking aantoonen, door den toestel in fig. 83 afgebeeld, en naar den uitvinder het *waterrad van Segner* genoemd. In een glazen of blikken vat M, dat van onderen op eene fijne punt rust en van boven met een staafje voorzien is, zoodat het gemakkelijk om eene vertikale as kan draaijen, bevindt zich water, dat door twee of meer van onderen daaraan bevestigde met zijdelingsche openingen voorziene buizen kan uitstroomen. Zoodra het water daaruit begint te vloeijen, begint de geheele toestel te draaijen in eene rigting tegenovergesteld aan die, volgens welke de uitstrooming plaats heeft.

Fig. 83.



77. **Gebruik van in beweging zijnde vloeistoffen als beweegkracht.** — Van eene in beweging zijnde vloeistof kan men gebruik maken als beweegkracht, door den waterstraal tegen een vast ligchaam te doen botsen, aan hetwelk de vloeistof alsdan hare beweging zal mededeelen. Het arbeidsvermogen der vloeistof zal zoowel van hare massa als van hare snelheid afhankelijk zijn, en even als bij vaste ligchamen worden uitgedrukt door het product $\frac{1}{2}MV^2$, dat de levendige kracht voorstelt (55). Het is deze kracht, die in toepassing gebragt wordt bij de zoogenaamde onderslags-waterraderen; terwijl bij de bovenslags-raderen de werking nog vermeerderd wordt, doordat men het water ook door zijn gewigt laat wer-

ken. Wij kunnen ons hier niet bezig houden met de beschrijving en theorie dier werktuigen, die meer tot het gebied der toegepaste werktuigkunde behooren.

C. MOLECULAIRE WERKINGEN VAN DE VOCHTDEELTJES OP ELKANDER EN OP VASTE LIGCHAMEN.

78. **Cohaesie bij vloeistoffen.** — Van de moleculaire krachten sprekende, welke tusschen de deeltjes der ligchamen werkzaam zijn (15), hebben wij deze in twee soorten onderscheiden; die, welke bewerkt, dat de deeltjes elkander aantrekken, en die, door welke zij zich van elkander trachten te verwijderen. Bij de vloeistoffen zullen die beide krachten gelijk zijn, zoolang de deeltjes ten opzigte van elkander in den toestand van evenwigt zijn. Zoodra men echter door eene uitwendige kracht in de betrekkelijke ligging der deeltjes eene wijziging tracht te brengen, zal de aantrekkende kracht de overhand verkrijgen; en men zal dus bij de vloeistoffen inderdaad eene kracht van zamenhang of cohaesie waarnemen, die zelfs onder gunstige omstandigheden kan gemeten worden. Wordt namelijk eene vlakke schijf, onverschillig van welke stof, in horizontalen stand aan den eenen arm eener balans vastgemaakt, en nadat er evenwigt gemaakt is, tot op de oppervlakte eener vloeistof neêrgelaten, dan moet men op de andere schaal eenige gewigten bijvoegen, om de schijf weder van de vloeistof af te trekken. Dat deze gewigten noodig zijn om den zamenhang der vochtdeeltjes te overwinnen, en niet de adhaesie van de vloeistof aan de schijf, blijkt daaruit, dat aan deze, als zij van het vocht afgetrokken is, nog vochtdeeltjes blijven kleven; men heeft dns de vochtdeeltjes van elkander gerukt. Hieruit blijkt tevens, dat bij vloeistoffen, waarbij dit verschijnsel zich vertoont, de cohaesie geringer is, dan hare adhaesie van het vaste ligchaam. Gay-Lussac heeft bevonden, dat om eene glazen schijf van ruim 11,8 duim middellijn van de oppervlakte van water af te trekken 59.4 wigtjes noodig waren. Voor terpentijnolie bedroeg het gewigt 34.1, voor alcohol van 0.8169 soortelijk gewigt 31.08 wigtjes. De cohaesie is dus niet bij alle vloeistoffen dezelfde; bij eene zelfde vloeistof vermindert zij bovendien, als de warmte toeneemt.

79. **Adhaesie tusschen vloeistoffen en vaste ligchamen.** — De voorgaande proef, gewoonlijk de proef van Taylor genoemd, deed ons, behalve den zamenhang der vloeistoffen, ook hare aankleving aan vaste ligchamen waarnemen. Het is door deze, dat de vochtdeelen, tegen de werking der zwaartekracht in, onder aan vaste ligchamen kunnen blijven hangen.

Schenkt men water uit een glas, dan loopt dit dikwijls langs den buitenkant af; dit is een gevolg der adhaesie, die men verminderen kan door den rand met vet te besmeren. Houdt men een glazen staafje in eene schuine rigting in een waterstraal, dan loopt het vocht langs het staafje neêr. De adhaesie is echter niet bij alle vochten dezelfde, daar sommige de oppervlakte, waarmede zij in aanraking komen, bevochtigen, terwijl andere zulks niet doen.

De meeste spreiden zich op eene goed schoon gemaakte glazen plaat uit; alleen kwikzilver doet het niet. Op metalen oppervlakten daarentegen, ijzer alleen uitgezonderd, breidt zich kwikzilver uit. Is eene glazen plaat met vet besmeerd, dan zal een daarop geworpen waterdruppel zijne bolvormige gedaante behouden, en er over heen rollen zonder ze te bevochtigen. Dat er ook dan, wanneer er geene bevochtiging plaats heeft, toch nog adhaesie is, blijkt, wanneer men de proef van Taylor met eene glazen schijf op kwikzilver doet; er zal dan inderdaad eene zekere kracht noodig wezen, om de schijf van de oppervlakte los te rukken; daar er echter geene vloeistof aan hangen blijft, is die kracht enkel noodig om de adhaesie te overwinnen. Wij zien dus, dat de cohaesie bij kwikzilver aanzienlijker is, dan zijne adhaesie aan glas. De grootte dezer laatste kracht laat zich moeijelijk bepalen; de warmtegraad oefent er ook een sterken invloed op uit.

80. **Bolvormige gedaante van vloeistoffen.** — Wanneer eene vloeistof uitgestort wordt in een vat, neemt zij den vorm van dat vat aan, terwijl hare oppervlakte horizontaal blijft. Dit is, zooals wij gezien hebben, het gevolg zoowel van de werking der zwaartekracht, als van de bewegelijkheid der deeltjes. De omstandigheden kunnen echter van dien aard zijn, dat van deze wet wordt afgeweken; dit kan men bijv. waarnemen, als men geringe hoeveelheden eener vloeistof uitstort op eene oppervlakte, welke zij niet bevochtigen, zooals kwik over eene glazen plaat of over een vel papier, of water over eene vette oppervlakte. De vloeistof breidt zich dan, zooals wij gezien hebben, niet uit, maar vormt druppels, die des te zuiverder bolvorm zullen hebben, naarmate zij kleiner zijn. Dit wordt veroorzaakt, door dat de cohaesie der vochtdeeltjes aanzienlijker is, dan hunne adhaesie aan het vaste ligchaam. Dat deze laatste echter ook werkzaam is, blijkt daaruit, dat zeer kleine kwikbolletjes onder aan eene glazen plaat of aan een glazen staafje kunnen blijven hangen.

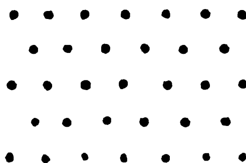
Het voorbeeld van de kleine kwikbolletjes op glas, van de waterbolletjes op vette oppervlakten, alsmede de nagenoeg bolvormige gedaante der regendroppels moet ons tot het vermoeden brengen, dat de vloeistoffen door den zamenhang hunner deeltjes een streven hebben om eene bolvormige gedaante

aan te nemen, doch dat in de meeste gevallen de zwaartekracht en de adhaesie van vaste ligchamen zulks verhinderen. Dat zulks inderdaad het geval is, blijkt uit de volgende proef, door Plateau uitgedacht. Men brengt in een glas met vlakke wanden een mengsel van water en alcohol, dat naauwkeurig hetzelfde soortelijk gewigt heeft als olijfolie. Is de vloeistof tot rust gekomen, dan brengt men zeer voorzigtig, door middel van eene pipet, daar binnen eene kleine hoeveelheid olie. Deze nu, gelijke digtheid hebbende als de vloeistof waarin zij gedompeld is, zal volgens de wet van Archimedes (64) als 't ware aan de werking der zwaartekracht onttrokken zijn; zij is niet met de wanden van het glas in aanraking, zoodat deze haar niet kunnen aantrekken; de moleculaire krachten tusschen de deeltjes der vloeistof kunnen dus ongehinderd hare werking uitoefenen. Men ziet dan ook aanstonds de olie de gedaante van een volmaakten bol aannemen (1).

Wij kunnen ons van de redenen, waarom zoodanige vloeibare massa juist eene bolvormige gedaante aanneemt, geene rekenschap geven, zonder eenigzins in nadere beschouwingen te treden aangaande den aard en de werking der krachten, welke de vochtmoleculen op elkander uitoefenen. Men neemt aan, dat de op onmeetbaar kleine afstanden tusschen de moleculen werkende aantrekkingskrachten, even als de algemeene aantrekkingskracht of gravitatie, afnemen in de omgekeerde vierkantsreden der afstanden, doch dat de afstootende krachten in veel sterkere reden veranderen. Wanneer dus twee moleculen uit hunnen evenwigtstoestand gebragt worden, waarin deze beide krachten elkander vernietigen, dan zal bij eene toenadering de afstooting, doch bij hunne verwijdering de aantrekking de overhand hebben, zoodat zij altijd weder trachten tot dien evenwigtstoestand terug te keeren. Daar voorts elk deeltje door alle die het omringen evenzeer moet aangetrokken worden, opdat er evenwigt zij, zoo moeten ook de onderlinge afstanden der moleculen in alle rigtingen gelijk zijn. Deze voorwaarde is ook noodzakelijk, opdat de vloeistof haar zelfde volume en dezelfde digtheid houde, welke ook haar vorm zij. Dit zal alleen het geval kunnen zijn, wanneer de moleculen gegroepeerd zijn, zooals in fig. 84 is voorgesteld, met dien verstande, dat op elke laag weder eene andere volgt, waarin de deeltjes op dezelfde wijze gegroepeerd zijn, even als zulks bij de kogelstapels het geval is. Elk deeltje is dan door 12 andere omringd, waarvan zes in de laag zelve, drie in de

(1) Men zorge bij deze proef, dat de beide vloeistoffen gelijken warmtegraad hebben, alvorens de olie in het mengsel van alcohol en water te brengen. Is dit niet het geval, dan zal, als de olie warmer wordt door de aanraking met het mengsel, de bol soortelijk ligter worden, tot aan de oppervlakte rijzen, en de bolvormige gedaante verliezen.

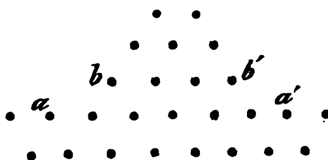
Fig. 84.



daarboven liggende, en drie in die, welke zich er onder bevindt. Hieruit volgt dus, dat de deeltjes eener vloeistof alleen dan in evenwigt zullen zijn, indien zij door een plat vlak begrensd is. De bevestiging dezer theorie vinden wij in de omstandigheid, dat eene vloeistof, die tusschen de wanden van een vat is besloten, niet eerder in evenwigt is, alvorens de bovenste oppervlakte geheel vlak is; alleen aan de wanden neemt men eene afwijking hiervan waar, doch hiervoor zijn, zooals wij straks zien zullen, bijzondere redenen.

Is de oppervlakte van de vloeistof gebogen of heeft zij eenen anderen vorm, dan is het evenwigt tusschen de moleculen verbroken. Wordt bijv. een gedeelte der vloeistof opgeligt, zoodat de moleculen gegroepeerd zijn op de wijze in fig. 85 aangewezen, dan zullen wel de meeste moleculen aan de oppervlakte nog op dezelfde afstanden als vroeger van elkander liggen, doch bij *a* en *b*, *a'* en *b'* is zulks niet het geval. Deze zijn te ver van elkander gekomen; *a* tracht dus *b*, en *a*, tracht *b*, naar beneden te trekken, en bewerken dus, dat de moleculen weder den evenwigtstoestand van fig. 84 aannemen. Door de waarneming wordt ook dit bevestigd. Met een glazen staafje kan men wel een gedeelte eener horizontale vloeibare oppervlakte, dat door de adhaesie er aan kleeft, een weinig opligten, zonder dat de zamenhang tusschen de deeltjes ophoudt; maar zoodra deze verbroken wordt, hernemen de opgeligte deeltjes weder hunnen normalen stand ten opzigte van elkander. Dat dit niet als een enkel gevolg der zwaartekracht mag beschouwd worden, blijkt daaruit, dat hetzelfde plaats heeft, wanneer men de proef doet met water, dat onder aan eene oppervlakte hangt; om hunnen evenwigtstoestand te hernemen moeten de deeltjes zich dan tegen de rigting der zwaartekracht in bewegen.

Fig. 85.



Daar eene vloeistof dus een streven toont om in een plat vlak te eindigen, moet de oppervlakte altijd in eene zekere spanning verkeeren, zoodra de deeltjes uit dien normalen toestand gebragt zijn; en deze spanning zal des te aanzienlijker zijn, naarmate de afwijking van dien stand grooter is, of wat op hetzelfde neêrkomt, naarmate de kromming sterker is. Die normale toestand is echter bij eene geheel vrije massa niet mogelijk. Door verschillende platte vlakken kan zij niet begrensd worden, daar de scherpe kanten het allerminst

volgens deze theorie bestaanbaar zijn; zij zouden terstond door de aantrekking der naastliggende moleculen afgerond worden. Zij moet dus een gebogen oppervlak hebben. Is echter de kromming niet overal dezelfde, dan zal ook daar, waar zij de sterkste is, de spanning grooter wezen, en de massa zal niet eer tot rust komen, alvorens de kromming en dus ook de spanning overal gelijk is; dit zal eerst dan het geval zijn, als de vloeibare massa den vorm van een bol aangenomen heeft. Zij bevindt zich dan in een toestand van evenwigt, die alleen daarin verschillend is van dien, waarin zich eene door een plat vlak begrensde vochtmassa bevindt, dat de buitenste laag moleculen eene spanning of drukking op de daar binnen liggende uitoefent, en dat dus de massa als 't ware kan beschouwd worden als door een dun elastisch huidje ingesloten, dat de daar binnen gelegene deeltjes te zamen houdt en zelfs zoude zamen drukken, indien daartoe de mogelijkheid bestond.

In deze theorie, die grootendeels het eerst door Mile (1838) is bekend gemaakt, vinden wij eene volkomene verklaring van de bolvormige gedaante van de aan de werking der zwaartekracht onttrokkene vochtmassa bij de proef van Plateau, alsook van den vorm der kwik- en waterbolletjes op eene oppervlakte, welke ze niet bevochtigen. Worden de bolletjes wat grooter genomen, dan verkrijgen zij eene afgeplatte gedaante, doch dit moet slechts aan de werking van de zwaartekracht worden toegeschreven. Dat ook zelfs dan nog eene vrij aanzienlijke spanning aan de oppervlakte dier druppels plaats heeft, blijkt, wanneer men kwikdruppels op eene horizontale glazen plaat brengt, en daarop eene tweede glazen plaat legt; de beide platen zullen dan niet met elkander in aanraking zijn, maar de bovenste blijft op eenigen afstand van de onderste, en wordt als 't ware door de afgeplatte kwikbolletjes gedragen.

81. **Moleculaire werkingen bij de vorming van vochtstralen.** — De verschijnselen die zich vertoonen, als een vochtstraal uit eene ronde opening in een dunnen wand stroomt, berusten, zooals wij reeds hebben opgemerkt (73), geheel op de moleculaire werking der vochtdeeltjes. Van de verschillende verklaringen, die men daarvan heeft trachten te geven, vermelden wij alleen die van Plateau (1850), welke de eenvoudigste is en het meest in verband met de andere moleculaire werkingen der vloeistoffen.

Wij hebben gezien, dat eene vochtmassa den vorm van een bol aanneemt, wanneer zij buiten den invloed der zwaartekracht en der adhaesie van vaste ligchamen blijft. Is de adhaesie werkzaam, dan zal de bolvorm niet kunnen bestaan, zooals uit de volgende proef van Plateau blijkt, welke men zeer gemakkelijk kan herhalen. In een glazen bak, gevuld met een mengsel van water en alcohol van gelijke digtheid als olijfolie, plaatst men twee even groote ronde

glazen schijfjes juist tegenover elkander op eenen afstand niet grooter dan drie maal hunne middellijn. Tusschen deze schijfjes brengt men olie, die aan beide zal aankleven, en wel een weinig meer dan de inhoud van een cilinder, die de twee schijfjes tot grond- en bovenvlak zoude hebben. Daarna neemt men door eene pipet zooveel olie weg, dat de overblijvende juist de gedaante van een cilinder heeft. Deze zal even als de bol eene evenwigtsfiguur zijn; het is echter nu niet alleen de zamenhang der deeltjes, die oorzaak is, dat de massa deze gedaante aanneemt en behoudt, maar de gezamenlijke werking van de cohaesie en van de adhaesie aan de glazen schijfjes. Door de hoogere wiskunde kan men bewijzen, dat er inderdaad evenwigt moet plaats hebben, zoolang de hoogte van den cilinder kleiner blijft dan 3.14... maal de middellijn. De proef geeft hiervan de bevestiging, want wil men op deze wijze een langeren vochtcilinder daarstellen, dan behoudt de vochtmassa deze gedaante niet. Tracht men den cilinder uit te rekken, dan ontstaan er regelmatige vernaauwingen en verbreedingen, die zich hoe langer hoe duidelijker vertoonen. Als de vernaauwingen dun geworden zijn, dan scheidt zich daar de vochtmassa niet plotseling, maar gedurende een korten tijd schijnen de verbreedingen als door een dunnen bijna cilindrischen draad vereenigd, die zich daarna aan beide kanten van de grootere massa afscheidt en een klein bolletje vormt; de grootere massas, uit de verbreedingen ontstaan, vormen dan ook afzonderlijke bollen. De vochtmassa is dus overgegaan in eene reeks van even groote bollen, op gelijken afstand van elkander geplaatst, en tusschen welke zich bovendien kleinere bolletjes bevinden.

De overeenkomst van deze verschijnselen met die welke door Savart bij den waterstraal zijn waargenomen, valt terstond in het oog. De oorzaak van den overgang van den cilindrischen straal in eene reeks van druppels moet dus alleen in de moleculaire werkingen der vloeistof gezocht worden. Dat het troebele gedeelte niet terstond bij de opening begint, en dat de knoopen en buiken in het heldere gedeelte ter naauwernood merkbaar zijn, is het gevolg van den gedurigen nieuwen toevoer van vloeistof, en van de snelheid, waarmede de deeltjes zich voortbewegen.

82. **Capillaire verschijnselen.** — Wordt kwikzilver in een glas, onverschillig van welken vorm, geschonken, dan neemt de vochtmassa wel den vorm aan van het vat, maa. de wanden worden niet bevochtigd, en zijn dus niet in onmiddelijke aanraking met de vloeistof. Men kan zich hiervan overtuigen door er olie of water op te schenken, dat dan tusschen de wanden en het kwikzilver zal dringen. Men kan de vochtmassa dus beschouwen als een groote druppel, die door haar gewigt en door den tegenstand der wanden

den vorm van het vat aanneemt. De bovenste oppervlakte kan geen volkomen vlak zijn, daar zij dan nabij de wanden scherpe kanten zoude moeten hebben, hetgeen in den evenwigtstoestand der moleculen onmogelijk is. Zij zal dus daar eene kromming hebben, zooals bij A (Fig. 86), waar dientengevolge eene spanning moet plaats hebben. Dat deze spanning zeer aanzienlijk is blijkt, als men het kwikzilver in den bak schenkt tot het boven den rand staat; door de spanning aan de gebogene oppervlakte worden de deeltjes bij elkander gehouden. Dompelt men een staafje in het kwikzilver, dan zal ter weêrszijden van dit de oppervlakte eene kromming ondervinden; geschiedt dit echter nabij den wand, zooals bij B, dan zullen er twee krommingen ontstaan, de eene naar den wand, en de andere naar het staafje toegekeerd. Is het staafje zoo digt bij den wand, dat de twee krommingen bovenaan een scherpen kant zouden te weeg brengen, dan zullen de beide krommingen als 't ware ineenloopen en eene sterkere kromming vormen; de spanning zal dus ook toenemen. Het gevolg hiervan zal zijn, dat de vloeistof tusschen het staafje en den wand door die spanning neêrgedrukt wordt, en lager staat dan aan de andere zijde van het staafje. Hetzelfde zal het geval zijn, wanneer er twee staafjes digt bij elkander ingedompeld worden, en daar de spanning toeneemt, naarmate de kromming sterker is, zal ook de nederdrukking van het kwikzilver aanzienlijker wezen, naarmate de staafjes digter bij elkander staan. Dompelt men een naauw buisje (Fig. 87) in het kwikzilver, dan zal de vloeistof eveneens binnen in het buisje lager staan dan daar buiten. In a drukt de spanning de deeltjes naar beneden, en zoude ze onbepaaldelijk neêrdrukken, zoo niet een kolommetje bc, van gelijke doorsnede als het buisje, door zijn gewigt tegenwerkte. In den evenwigtstoestand, dat is, als het vocht op eene bepaalde hoogte is blijven staan, mag men dus aannemen, dat de spanning in a even groot is als het gewigt van het vochtkolommetje bc. De neêrdrukking zal dus moeten toenemen, als de middellijn van het buisje kleiner wordt. Men kan zich hiervan overtuigen, door de proef met buisjes van verschillende middellijn te herhalen. Wegens de ondoorzigtigheid van het kwikzilver is het echter moeijelijk de grootte der neêrdrukking te bepalen. Men bedient zich daarom bij voorkeur van twee buizen, die met elkander gemeenschap hebben, waarvan de eene zoo wijd genomen wordt, dat de neêrdrukking kan verwaarloosd worden. Volgens de wetten der hydrostatica

Fig. 86.

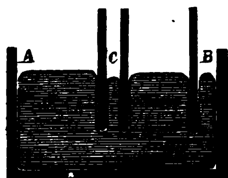
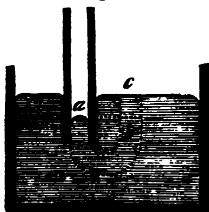


Fig. 87.



zoude het vocht in beide even hoog moeten staan; het verschil wijst dus de neêrdrukking aan. Men zal bevinden, dat deze in een buisje veel aanzienlijker is, dan tusschen twee vlakke platen, wier afstand even groot is als de middellijn van het buisje, en dat zij bij naauwe buisjes nagenoeg omgekeerd evenredig is aan de middellijn. Aan dergelijke naauwe buisjes, als waarvan hier sprake is, geeft men den naam van *haarbuisjes* of *capillaire* buisjes; de moleculaire verschijnselen der vochten, waartoe ook die in zoodanige buisjes behooren, worden daarom doorgaans capillaire verschijnselen genoemd, en de kracht of oorzaak wordt door den naam van *capillariteit* aangeduid.

Wordt in een buisje, dat overal even wijd is, een weinig kwikzilver gebragt, dan zal het daarin een cilindertje vormen, aan de beide uiteinden door even sterk gekromde oppervlakken begrensd. Is het buisje daarentegen kegelvormig, zooals in fig. 88, dan zal een kwikdruppel aan den naauwen kant *p* van het buisje eene sterkere kromming hebben dan aan den wijderen kant *q*. De spanning bij *p* zal dus ook aanzienlijker zijn dan die bij *q*, hetgeen eene beweging naar het wijdere gedeelte zal ten gevolge hebben, totdat de druppel eene nagenoeg bolvormige gedaante zal hebben aangenomen. Wanneer men een naauw buisje, in welks uiterste gedeelte zich een kwikkolommetje bevindt, in horizontalen stand in aanraking brengt met een grooteren kwikdruppel, dan gaat het kwikzilver, dat zich in het buisje bevindt, terstond er uit naar dien druppel. De beide vochtmassa's namelijk vormen, als zij met elkander in aanraking komen, slechts eene massa; aan het uiteinde binnen in het buisje is eene zeer sterke spanning ten gevolge van de sterke kromming; daarbuiten, aan de oppervlakte van den veel grooteren druppel, is die veel geringer; hierdoor ontstaat dus beweging, ten gevolge van welke de kwikkolom geheel uit het buisje geraakt.

Fig. 88.



Gaan wij thans over tot de capillaire verschijnselen, die zich voordoen bij die vochten, welke de oppervlakten, waarmede zij in aanraking komen, bevochtigen. Daar de adhaesie in dat geval de cohaesie overtreft, zoo is het niet meer voldoende alleen van deze bij de verklaring der verschijnselen rekenschap te houden, maar moet worden nagegaan, welke wijziging de adhaesie daarbij moet teweeg brengen. Vooreerst zal deze het onmogelijk maken, dat het vocht in de nabijheid der wanden eenen gebogenen vorm aanneemt, zooals wij bij het kwikzilver in het glazen vat waarnemen. Wij zouden dus moeten aannemen, dat het vocht aan de oppervlakte volkomen vlak moet zijn, zoo niet de aantrekking van de vaste deeltjes van den wand hierin verandering bragt. De moleculen *c*, *d* van den wand (Fig. 89) zullen op het deeltje *a*

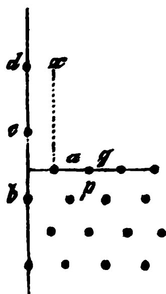


Fig. 89.

der vloeistof eene aantrekking uitoefenen; dit kan echter niet geheel daaraan gehoorzamen, daar het ook door de vochtdeeltjes *p* en *q* sterker aangetrokken wordt, zoodra het zich daarvan tracht te verwijderen. Het gevolg van deze gezamenlijke werkingen, van welke echter, zooals uit de proeven over de adhaesie blijkt, die van den wand op het vocht de overhand hebben moet, is dat het eene rigting *ax* volgen zal, die nagenoeg evenwijdig aan den wand moet wezen. Eenmaal toch door de aantrekking van den wand in beweging gebragt, zal het klimmende vochtdeeltje weder door andere deeltjes aangetrokken worden, die het beletten zich meer van den wand te verwijderen. De verplaatsing van het deeltje *a* zal voorts niet zonder invloed blijven op de daar naast gelegene deeltjes der vloeistof, die ook hunne plaats zullen veranderen, totdat het vocht aan den wand van het vat een hol gebogen oppervlak vormt, zooals bij A in fig. 90. Wordt in de vloeistof een staafje gehouden, dan zal ter weerszijden van dit hetzelfde verschijnsel plaats hebben. Is dit staafje digt bij den wand geplaatst, zooals bij B, dan zouden de beide gebogene oppervlakten elkander als 't ware snijden, en dus eene scherpe verdieping vormen; deze kan echter, daar de vloeistof tracht een plat oppervlak te verkrijgen, niet blijven bestaan, en de vloeistof zal dus een weinig opklimmen, om ze aan te vullen. Tusschen den wand en een staafje, of ook tusschen de twee staafjes bij C, zal de vloeistof dus hooger staan dan daar buiten, en zij zal des te hooger klimmen, naarmate de staafjes digter bij elkander zijn. Houdt men dus twee platen B en C (Fig. 91), die eenen zeer scherpen hoek A met elkander maken, in eene vloeistof, dan zal deze des te hooger klimmen, naarmate men digter bij de doorsnede AD komt; het gevolg hiervan is, dat de oppervlakte van het water binnen tegen de platen eene kromme lijn vormt; de wiskunde leert, dat deze lijn eene hyperbool moet wezen.

Fig. 90.

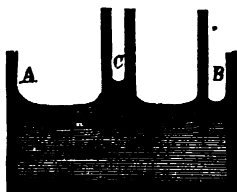
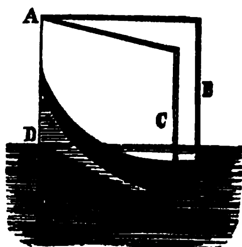


Fig. 91.



Hetzelfde wat bij twee glazen platen plaats heeft, wordt ook in naauwe buisjes waargenomen. Binnen in het buisje zal zich eene hol gebogene oppervlakte *a* (Fig. 92) vormen tengevolge van de adhaesie van het vocht

aan de wanden; door de cohaesie van de deeltjes tracht het zich weder tot een vlak

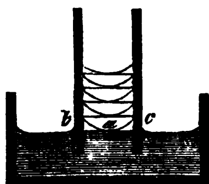


Fig. 92.

bc uit te breiden; aan den omtrek wordt het dan echter weder op nieuw opgeligt, en zoo voort, zooals in de figuur is voorgesteld. Deze opheffing, die echter niet stootsgewijze, maar gelijkmatig plaats heeft, zal zoolang voortduren, totdat het gewigt der opgeligte hoeveelheid vocht evenwigt maakt met de kracht, die haar ophoudt. Deze kracht nu is voornamelijk de zamenhang der vochtdeeltjes; de adhaesie aan den wand is slechts in zooverre werkzaam, dat daardoor het laagje der vloeistof, waarmede de wand onmiddelijk in aanraking is, wordt opgehouden, terwijl de overige deeltjes binnen dit laagje als in een vochtkokertje opstijgen. Bij buizen van gelijke middellijn zal de hoogte dus aanzienlijker moeten zijn, wanneer de zamenhang der vloeistof grooter is. Was de zamenhang bij alle vochten even groot, dan zouden de hoogten zich moeten verhouden in de omgekeerde reden der digtheden. Uit genomen proeven blijkt, dat de hoogte in een buisje van ééne streep middellijn bij eene temperatuur van 18° voor water 29.79 strepen, voor alcohol van 0.8196 s. g. 12.18, voor terpentijnolie 12.72, en voor ether 8.34 strepen bedraagt. Bij vermeerdering van temperatuur vermindert de hoogte; men heeft hierbij echter nog geene vaste wet kunnen ontdekken. De dikte van de wanden oefent geenen invloed uit op de hoogte van het opgeligte kolommetje; de stof, waaruit zij zijn zamengesteld, schijnt niet zonder invloed te zijn. Daarentegen hangt de hoogte niet af van den vorm der wanden beneden de bovenste oppervlakte van het vochtkolommetje, daar het vocht even hoog staat in eene buis, die van onderen wijd uitloopt, als in eene die overal dezelfde middellijn heeft, mits slechts de wijdte aan de bovenoppervlakte van de vochtkolom gelijk is. Dat alleen de bovenste oppervlakte der vloeistof invloed uitoefent op de hoogte, tot welke zij in de capillaire buis opklimt, kan ook door de volgende zeer gemakkelijk te verrigten proef aangetoond worden. Men plaatst een buisje bijv. van twee strepen middellijn in het water; dit zal er in opstijgen tot eene hoogte van nagenoeg 1.5 duim. Brengt men nu boven in het buisje door middel van eene fijne pipet eene zeer geringe hoeveelheid ether, dan zal deze langs de wanden van het buisje naar beneden dalen, en op de oppervlakte van het waterkolommetje aankomen, waarop hij, als soortelijk ligter, liggen blijft. Maar zoodra de ether met het water in aanraking is gekomen, daalt het kolommetje, totdat het slechts ongeveer 3 strepen hoog is. Het is nu niet meer door het water, dat de capillaire werking wordt voortgebragt, maar door den ether; de capillairhoogte moet dus ook geringer zijn. Dat het kolommetje kleiner is, dan wanneer het buisje in ether gedompeld is,

komt daarvan, dat het nog grootendeels uit water bestaat, dat soortelijk zwaarder is dan ether. Hierin vinden wij dus juist de bevestiging van het hiervoren opgemerkte, dat het gewigt der opgeligte vochtmassa evenwigt moet maken met de kracht, aan de bovenste oppervlakte ontwikkeld.

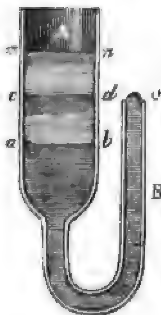
Dat in eene naauwe buis de capillaire werking sterker is dan in eene wijde, blijkt ook nog uit de volgende proef. In een kegelvormig buisje, in fig. 93 in doorsnede voorgesteld, bevindt zich een waterkolommetje A. De kromming in het naauwere gedeelte bij *p* sterker zijnde dan die bij *q*, zal ook de kracht, waarmede het vocht naar *p* getrokken wordt, grooter zijn, dan die welke het in de tegenovergestelde rigting tracht voort te trekken. De vloeistof zal zich dus naar het naauwere gedeelte van het buisje moeten begeven, hetgeen inderdaad door de proef bevestigd wordt.

Fig. 93.



De proef van Plateau (80) toont, dat bij de vloeistoffen, die vaste ligchamen bevochtigen, evenzeer als bij kwikzilver, een streven is waar te nemen, om onder bijzondere omstandigheden door een bol vlak begrensd te worden. Men kan gemakkelijk aantoonen, dat ook in dat geval eene vrij sterke spanning aan de oppervlakte plaats heeft. In eene wijde buis A (fig. 94), met een naauw buisje B verbonden, schenke men langzaam water. Dit zal in B zooveel hooger staan dan in A, als de capillairhoogte van water in de naauwe buis bedraagt. Zij *ab* de waterspiegel in de wijde buis, als het vocht in de naauwe juist aan het uiteinde *o* gekomen is; dan zal het daar eene holle oppervlakte vormen. Schenkt men nu voorzigtig bij, tot het water tot *cd* staat, dan zal het vocht bij *o* niet uit de buis komen, daar de oorzaak, waardoor het klimmen zoude, namelijk het hooger gelegene gedeelte van den wand der capillaire buis, ontbreekt. Alleen zal de oppervlakte hoe langer hoe minder hol worden, en vlak zijn, als het water tot *cd* staat. Schenkt men er nu nog meer bij, dan zoude, volgens de wetten der hydrostatica, het vocht bij *o* moeten uitvloeijen; dit geschiedt echter niet, maar er vormt zich daar een bolvormig oppervlak. De spanning op dit oppervlak zal genoegzaam zijn om evenwigt te maken met de opwaartsche drukking in B, ontstaan door bijvoeging van vocht in A tot aan *mn*, even ver boven *cd* gelegen, als *ab* zich er onder bevindt. Eene dergelijke werking neemt men waar, als men een capillair buisje in een vocht dompelt, en het er dan weder uithaalt, den vinger op de bovenste opening houdende; laat men dien los, dan zal een

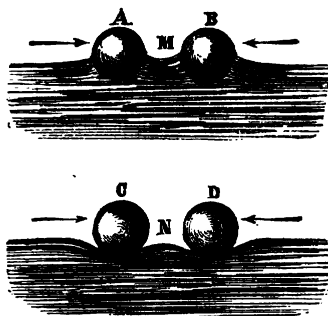
Fig. 94.



gedeelte van het vocht er uitloopen, maar het daarin blijvende kolommetje zal langer zijn dan de capillairhoogte, omdat de druppel, die onderaan blijft hangen, eene spanning veroorzaakt, aanzienlijk genoeg, om een vochtkolommetje tegen de rigting der zwaartekracht op te houden. Het kolommetje zal des te grooter wezen, naarmate de wanden van de buis dunner zijn, omdat dan ook de druppel kleiner en dus de spanning op de oppervlakte sterker is.

Worden op een vocht twee bolletjes gelegd van geringer soortelijk gewigt, zoodat zij drijven, dan bemerkt men dat zij, op geringen afstand van elkander geplaatst, elkander aantrekken, als zij beide bevochtigd worden, of beide droog blijven De oorzaak van dit verschijnsel moet ook in de capillariteit gezocht worden. Wanneer namelijk A en B (Fig. 95) door de vloeistof bevochtigd worden, dan zal deze, als zij digt bij elkander zijn, bij M hooger staan dan ter weêrszijde van de bolletjes, en daar een hol gebogen oppervlak vormen. De hierdoor ontstaande beweging der vochtdeeltjes zal zich aan de bollen mededeelen, die zich dien ten gevolge naar elkander bewegen. Heeft er geene bevochtiging plaats, dan gebeurt hetzelfde, daar de tusschen de bollen C en D bol staande vloeistof N een plat vlak tracht te vormen.

Fig. 95.



Volgens de wet van Archimedes moeten zwaardere ligchamen in eene ligtere onderzinken. Legt men echter eene naald, wier oppervlak men een weinig vettig gemaakt heeft, op water, dan blijft zij drijven. Ook dit verschijnsel staat met de capillariteit in verband. Het vocht zal ter zijde van het vaste ligchaam eenigzins bol staan; op de oppervlakte ontstaat dus eene spanning, welke door het gewigt der naald niet kan overwonnen worden.

De capillariteit geeft ons de verklaring van eene menigte verschijnselen, die wij dagelijks waarnemen. Wanneer men poreuse ligchamen gedeeltelijk in een vocht dompelt, dan stijgt dit weldra daarin op tot eene aanzienlijke hoogte. De poriën vormen als 't ware eene menigte zeer naauwe capillaire kanalen, waarin de vochten kunnen opklimmen. Broodsuiker, vele steensoorten, onverglaasd aardewerk, het lampekatoen, en vele dierlijke en plantaardige weefsels kunnen tot voorbeeld strekken. Ook poedervormige stoffen kunnen als zoodanig beschouwd worden; vochten, die zouten opgelost houden, stijgen tusschen de zandkorreltjes op, en brengen die stoffen tot de oppervlakte der

aarde, waar het water verdampt en de zouten dus in den vasten toestand overblijven.

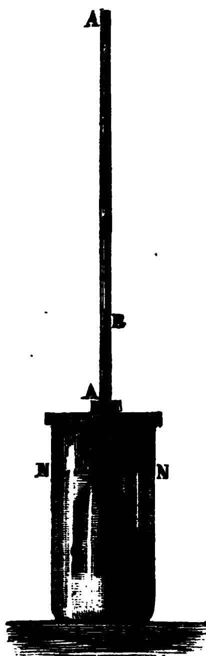
83. **Moleculaire werking tusschen verschillende vochten, diffusie, endosmose.** — Brengt men eene geringe hoeveelheid water op kwikzilver, of olie op water, dan verspreidt deze zich terstond daarover; deze vochten oefenen dus ook adhaesie op elkander uit. In de meeste gevallen bepaalt zich echter deze werking niet tot de oppervlakten, maar ontstaat er na korten tijd een homogeen mengsel. Die werking noemt men *diffusie*. Dikwijls heeft daarbij scheikundige werking plaats; somtijds worden daarbij ook nog andere bijzondere verschijnselen waargenomen. Wanneer men bijv. gelijke volumen alcohol en water vermengt, dan zal het volume van het mengsel geringer zijn, dan de som der beide afzonderlijke volumen. Vult men eene lange, aan een eind geslotene glazen buis half met water, en schenkt er dan voorzigtig alcohol bij, tot de buis vol is, dan zal deze als soortelijk ligter boven het water blijven; sluit men de buis nu met den vinger of met eene kurk, en keert men haar om, waardoor de beide vochten zich vermengen, dan bevindt men, dat zij niet meer geheel vol is; het eene vocht is dus als 't ware gedeeltelijk tusschen de deeltjes van het andere ingedrongen. Dat in zoodanige gevallen echter scheikundige werking plaats heeft, blijkt uit de verhooging van temperatuur, waarmede de vermenging gepaard gaat.

De diffusie van vochten wordt ook waargenomen, wanneer men op eene oplossing van de eene of andere stof voorzigtig zuiver water brengt; de aard der opgeloste stoffen oefent echter eenen grooten invloed uit op den tijd, die er verloopt, alvorens de geheele vochtmassa homogeen geworden is. Men moet echter wel in aanmerking nemen, dat er steeds twee stroomingen in twee tegenovergestelde rigtingen plaats hebben. Brengt men zuiver water boven op eene oplossing van keukenzout, dan zullen zooveel waterdeeltjes zich naar de oplossing begeven, als zoutdeeltjes naar het water.

De stroomingen van vochtdeeltjes in twee tegenovergestelde rigtingen wordt niet alleen waargenomen bij de zoogenaamde vrije diffusie, wanneer de vochten onmiddelijk met elkander in aanraking zijn, maar ook, wanneer deze door een poreusen wand van elkander gescheiden zijn. Daartoe kan men zich bedienen van eene dierlijke blaas, poreus aardewerk of ook andere kunstmatige poreuse wanden. Dutrochet, die het eerst deze bewegingen zorgvuldig onderzocht heeft, heeft ze *endosmose* genoemd. Om deze werking duidelijk aan te toonen en zelfs te meten, gebruikte hij den in fig. 96 afgebeelden toestel, dien hij *endosmometer* noemde. Een vat B, van onderen met eene dierlijke blaas en van boven met eene lange buis A voorzien, en met de eene of andere

vloeistof gevuld, wordt in een wijder vat, waarin zich eene andere vloeistof bevindt, gedompeld. Door de poriën van den wand, die beide vochten afscheidt, hebben nu twee stroomingen plaats, de eene van binnen naar buiten, de andere van buiten naar binnen gerigt. Is laatstgenoemde de sterkste, dan zal het volume van het vocht in B vermeerderen, en de bovenste oppervlakte bij R zal dus rijzen; is daarentegen de strooming van binnen naar buiten de sterkste, dan daalt het vocht in de buis AA. Doet men bijv. binnenin alcohol en buitenin water, dan zal na korten tijd de vloeistof bij R reeds merkbaar geklommen zijn; de strooming van het water naar den alcohol is dus sterker, dan die van den alcohol naar het water. Het is eigenlijk deze sterkste strooming, die Dutrochet endosmose noemde; aan de tegenovergestelde en minder sterke gaf hij den naam van *exosmose;* gewoonlijk echter wordt door den eersten naam het geheele verschijnsel aangeduid. Het vocht klimt steeds in de buis, en wordt er zelfs boven uitgedreven; de werking duurt zoo lang voort, tot de vloeistoffen binnen en buiten B gelijksoortig zijn; zij wordt echter hoe langer hoe langzamer, omdat het onderscheid tusschen de beide vloeistoffen steeds geringer wordt. Dat bij de endosmose niet alleen een stroom van buiten naar binnen, maar ook een van binnen naar buiten plaats heeft, blijkt daaruit, dat inderdaad alcohol in de buitenste vloeistof gevonden wordt. Nog duidelijker kan men zich hiervan overtuigen, wanneer men eene oplossing van blaauw zwavelzuur koperoxyd in B, en daarbuiten water schenkt. Het water dringt dan wel door de blaas binnen in B en doet de vloeistof bij R stijgen, maar ook een gedeelte der oplossing is naar buiten gekomen, zooals aan de blaauwe kleur van het vocht merkbaar is. Door voor de buitenste vloeistof dus steeds zuiver water in de plaats te stellen, zal men ten laatste de vloeistof binnen in de buis geheel door zuiver water kunnen vervangen, zooals inderdaad uit de proeven van Jolly gebleken is.

Fig. 96.



Oppervlakkig beschouwd, schijnt het aanzienlijk verschil in hoogte buiten het vat B en binnen in de buis strijdig te zijn met de hydrostatische wetten. Men kan ze echter niet beschouwen als gewone vaten, die gemeenschap met elkander hebben, daar door de uiterst naauwe capillaire poriën in den scheidingswand de hydrostatische drukking niet wordt voortgeplant.

De wetten der endosmose, dat is de invloed, dien de aard der vochten op de sterkte der stroomingen uitoefent, zijn nog zeer onvolledig bekend. Proeven door verschillende natuurkundigen in het werk gesteld, hebben dikwijls tot tegenstrijdige uitkomsten geleid. Uit de laatste onderzoekingen van Graham (1854) blijkt echter, dat alleen endosmose mogelijk is bij vloeistoffen die den wand bevochtigen, doch dat er ook enkele poreuse stoffen zijn, zoo als leder en gips, waardoor geene endosmose plaats heeft; dat, op geringe uitzonderingen na, de sterkste beweging plaats heeft van de meest verdunde naar eene sterkere oplossing, en dat water van alle vloeistoffen het sterkst door een organischen tusschenwand dringt; dat de temperatuur eenen merkbaren invloed op de verschijnselen uitoefent, en dat de endosmotische werking het krachtigst schijnt te wezen bij die stoffen, die op den wand eene scheikundige werking uitoefenen. Zoo lang echter de verschijnselen niet beter bekend zijn, is het onmogelijk de oorzaak der verschijnselen theoretisch naauwkeurig aan te wijzen. Eene volledige kennis der endosmose zoude voor de physiologie van veel belang zijn, daar zij stellig een nieuw licht zoude verspreiden over de beweging van sappen door het dierlijk ligchaam.

84. **Veêrkracht en zamendrukbaarheid van vloeistoffen.** — Wij hebben vroeger, over de bijzondere eigenschappen der vaste ligchamen sprekende (18), de opmerking gemaakt, dat vloeistoffen niet in denzelfden zin veêrkrachtig kunnen genoemd worden, als vaste ligchamen. Verstaat men echter door veêrkracht eenvoudig de eigenschap, dat er geene verandering van volume door eene uitwendige oorzaak kan plaats hebben, zonder dat dit zich weder herstelt onmiddelijk na het ophouden dier oorzaak, en laat men dus den vorm geheel buiten beschouwing, dan kan men ook de vloeistoffen veêrkrachtig noemen. Is eene vloeistof zamengedrukt, en houdt de uitwendige oorzaak, waardoor die zamendrukking was teweeg gebragt, daarna op, dan herneemt zij terstond weder haar vorig volume. De vermindering van volume is echter zoo gering, dat men het er lang voor gehouden heeft, dat alle vloeistoffen niet zamendrukbaar zijn; men noemde ze daarom veelal onzamendrukbare vloeistoffen, om ze te onderscheiden van de gassen, die men veêrkrachtige vloeistoffen noemde. Eerst in de voorgaande eeuw hebben onderzoekingen van Canton (1761) aangetoond, dat vochten kunnen zamengeperst worden; Oersted (1823) heeft echter de zamendrukking voor verschillende vochten het eerst naauwkeurig gemeten. Zijne waarnemingen zijn later door Colladon en Sturm (1837), Regnault (1847), en zeer onlangs door Grassi herhaald, die tot nagenoeg dezelfde resultaten gekomen zijn. Wij zullen hier niet de ver-

schillende werktuigen beschrijven, waarvan zij zich bediend hebben, maar ons tot mededeeling van eenige resultaten bepalen.

De zamendrukking is het geringst voor kwikzilver; zij bedraagt bij 0° 0.00000295 van het oorspronkelijk volume, wanneer op de oppervlakte eene drukking wordt uitgeoefend, gelijkstaande met die van eene kwikkolom van 76 duim, of van eene waterkolom van 10.33 el. Voor water is zij 0.0000503, voor alcohol 0.0000828, voor ether 0.0001110. Bij verhooging der temperatuur neemt de zamendrukbaarheid toe, vooral bij ether, waarvoor zij bij 14° reeds 0.0001400 bedraagt. Zij is voorts, zooals te verwachten was, evenredig aan de drukking.

Een gevolg van de zamendrukbaarheid van het water is, dat zijne digtheid op groote diepten een weinig aanzienlijker moet zijn, dan aan de oppervlakte. Daar echter de zamendrukking slechts gering is, zoo kan ook dit verschil doorgaans verwaarloosd worden; op eene diepte van 1000 ellen bedraagt de vermindering van volume slechts vijf duizendste, zoodat het soortelijk gewigt aldaar 1.005 zoude bedragen.



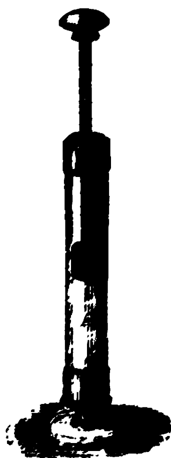
HOOFDSTUK V.

EVENWIGT EN BEWEGING BIJ GASVORMIGE LIGCHAMEN.

A. EVENWIGT VAN GASSEN.

95. Spankracht van gassen. — Bij de luchtsoorten heeft niet alleen de eigenschap plaats, die wij bij de vloeistoffen hebben opgemerkt, dat de deeltjes door eene uiterst geringe kracht kunnen verplaatst worden; maar de afstootende kracht (13), die tusschen hen werkzaam is, overtreft zoozeer hunnen zamenhang, dat zij reeds zonder uitwendige kracht zich van elkander trachten te verwijderen, en de grootst mogelijke ruimte te beslaan. Om luchtsoorten binnen eene bepaalde ruimte te houden is dus een van alle kanten gesloten vat noodig. De kracht, waarmede een aldus opgesloten gas op de wanden van het vat drukt, alsook op de oppervlakte van een ligchaam, dat het van alle kanten omgeeft, noemt men de *spankracht*, of ook wel, hoewel minder juist, de *veérkracht* of *elasticiteit* der luchtsoorten. De spankracht der lucht is dan vooral merkbaar, als men ze eerst zamengedrukt heeft, en dan weder aan zich zelve overlaat. Men kan ze gemakkelijk aantoonen door den in fig. 97 afgebeelden toestel, die uit niets anders bestaat, dan uit eene glazen buis, die aan het benedenste uiteinde gesloten is, en waarin een naauwsluitende zuiger gestoken is. Drukt men op den knop van den zuiger, dan zal de lucht, die zich in A bevindt, zamengedrukt worden; maar zoodra men den zuiger loslaat, wordt deze door de lucht, die zich ontspant, weder naar het opene uiteinde van de buis terug gedreven. Men zal bij deze proef tevens opmerken, dat er door de zamenpersing der lucht warmte ontstaat. Op dit verschijnsel komen wij later bij de behandeling der warmte terug.

Fig. 97.



Wij hebben boven (13) reeds opmerkzaam gemaakt op de onderscheiding der gasvormige ligchamen in die, welke tot nog toe niet anders dan in den gasvormigen toestand bekend zijn, en die welke bovendien zich ook als vloeibare of vaste ligchamen kunnen voordoen. Tot de eerste behooren de lucht die ons omringt, welke een mengsel van zuurstofgas en stikstofgas is (27); voorts waterstofgas, kooloxyd en stikstofoxyd; men noemt deze daarom *permanente* gassen, terwijl men alle andere bij tegenstelling niet-permanente gassen noemt. Daartoe behooren onder anderen koolzuur, zwaveligzuur, chloor.

Den naam van dampen geeft men doorgaans aan die gassen, welke zich ontwikkelen van ligchamen, die in den gewonen toestand vloeibaar of vast zijn; de belangrijkste zijn die van water, alcohol, aether, jodium, kwikzilver. Het is, zooals wij boven reeds hebben opgemerkt, waarschijnlijk, dat alle ligchamen in de drie verschillende aggregatietoestanden kunnen voorkomen; is zulks het geval, dan vervalt ook de onderscheiding, waarvan hier melding is gemaakt. Hetgeen de waarschijnlijkheid dezer overeenkomst bevestigt, is dat alle gasvormige ligchamen aan dezelfde physische wetten onderworpen zijn. Het zal daarom voldoende zijn, deze aan een van hen te onderzoeken, en wij nemen hiervoor het meest algemeen verspreide, de dampkringslucht.

86. **Voorwaarden van evenwigt bij gassen.** — Even als bij de vloeistoffen zijn er ook bij de gasvormige ligchamen eenige algemeene voorwaarden van evenwigt, die, omdat zij op een zelfde beginsel, de bewegelijkheid der deeltjes, gegrond zijn, voor beide dezelfde zijn. Bij gassen namelijk zal, even als bij vloeistoffen, eene drukking, aan enkele moleculen medegedeeld, gelijkelijk in alle rigtingen voortgeplant worden; terwijl bij eene luchtmassa, die zich in evenwigt bevindt, elk deeltje in alle rigtingen eene gelijke drukking ondervindt. Even als bij de vloeistoffen (58), zal dus ook bij de gassen de drukking evenredig zijn aan de gedrukte oppervlakte.

Deze overeenkomst tusschen luchtsoorten en vloeistoffen is oorzaak, dat men somtijds aan beide dezen laatsten naam geeft; men onderscheidt ze dan in veêrkrachtige en in drupvormige vloeistoffen.

87. **Zwaarte der lucht.** — De spankracht der lucht zoude ten gevolge moeten hebben, dat de deeltjes van den dampkring zich tot in het oneindige van elkander zouden verwijderen, zoo niet eene andere oorzaak ze bij de aarde hield. Deze oorzaak nu is geene andere dan de aantrekkingskracht, die de aarde er op uitoefent, met andere woorden, de zwaarte der lucht.

Dat lucht, even als in het algemeen alle gassen, zwaar is, blijkt door de volgende proef. Men neemt een vrij grooten glazen bol, van eene kraan voor-

zien, en weegt dien. Vervolgens verwijdert men met behulp van de luchtpomp, (een toestel, waardoor de lucht zooveel mogelijk uit eene beslotene ruimte uitgepompt kan worden, en dien wij later beschrijven zullen) een gedeelte van de lucht, die zich in den bol bevindt, en sluit de kraan. Brengt men hem nu weder op de weegschaal, dan zal men bevinden, dat hij aan gewigt verloren heeft.

88. **Drukking der lucht.** — De zwaarte van de lucht moet ten gevolge hebben, dat de luchtlagen welke zich het digtst bij de oppervlakte der aarde bevinden, de drukking van de hooger gelegene ondervinden. Daar door eene meerdere drukking het volume geringer wordt, en dus de digtheid grooter, zoo zullen de benedenste luchtlagen digter zijn dan de hoogere; zij zullen des te ijler zijn, naarmate men zich verder van de aarde verwijdert. De lucht kan echter niet in evenwigt zijn, zoo niet de drukking, en dus ook de digtheid, in eene zelfde horizontale laag dezelfde is. De digtheid van den dampkring is dus niet overal gelijk; daarenboven kan men ook zijne hoogte boven de oppervlakte der aarde niet onmiddelijk waarnemen, en men is dus niet in staat op die wijze zijn gewigt of zijne drukking op eene bepaalde oppervlakte te berekenen. Men kan echter het gewigt van den dampkring proefondervindelijk op de volgende wijze bepalen.

Fig. 98.



Men neemt eene aan het eene uiteinde toegesmoltene glazen buis CD (Fig 98), en schenkt ze vol kwikzilver. Vervolgens sluit men ze met den vinger, keert ze om, dompelt het onderste uiteinde in een bak met kwikzilver B, en neemt den vinger weg, als dat uiteinde geheel onder het kwikzilver is. In plaats dat het kwikzilver dan door zijne zwaarte geheel uit de buis in den bak valt, bevindt men dat de buis, zoo zij kort is, geheel met kwikzilver gevuld blijft, doch dat, zoo

zij langer dan 76 duim is, eene kwikkolom van 76 duim daarin blijft staan, terwijl boven deze bij A eene ledige ruimte overblijft. De oorzaak van dat verschijnsel is alleen de drukking der lucht. Want volgens de wetten van het evenwigt van vloeistoffen moeten alle vochtdeeltjes, in eene zelfde horizontale laag gelegen, eene gelijke drukking ondervinden. Die, welke zich op de oppervlakte van het kwikzilver in den bak bevinden, ondervinden de drukking der lucht; die, welke in dezelfde laag binnen in de buis gelegen zijn, worden door de kwikkolom gedrukt. Daar nu deze beide drukkingen even groot moeten zijn, zal de drukking der lucht gelijk zijn aan die van eene kwikkolom van 76 duim. Daar het soortelijk gewigt van kwikzilver 13.596 is, zal dus elke vierkante duim eene drukking ondervinden van 1.033 ponden.

Men doet deze proef gewoonlijk met kwikzilver, omdat dit de zwaarste der bekende vloeistoffen is, en dus de kolom, die evenwigt maakt met de luchtdrukking, kleiner zal zijn, dan wanneer men een ander vocht neemt. Had men water genomen, dan zoude eene 13.596 maal grootere kolom, dus van 10.33 ellen noodig zijn, om met de drukking der lucht evenwigt te maken, en men zoude dus eene buis van minstens $10\frac{1}{2}$ el moeten hebben, om zulks aan te wijzen.

Men neemt den nagenoeg standvastigen druk van de lucht aan de oppervlakte der aarde dikwijls als eenheid aan, wanneer men aanzienlijke drukkingen, onverschillig hoe zij worden uitgeoefend, op eene eenvoudige wijze wil uitdrukken. Gewoonlijk noemt men die eenheid dan kortheidshalve eene *atmospheer*. Eene drukking van éénе atmospheer beteekent dus eene drukking van 1.033 ponden op iederen vierkanten duim; eene drukking van 20 atmospheren duidt dus eene drukking van 20,66 pond op iederen vierkanten duim aan.

Men zal op grond van de wetten der hydrostatische drukking ligt inzien, dat de vorm der buis geenen invloed op het verschijnsel kan uitoefenen. Ook de stand doet er niets toe, mits men door de hoogte der kwikkolom slechts de vertikale hoogte van hare bovenste oppervlakte boven de kwikoppervlakte in het bakje verstaat. Houdt men de buis schuin, dan ziet men de vloeistof zich meer naar het bovenste uiteinde begeven, zonder dat echter de vertikale hoogte der kolom verandert; is de stand zoo schuin, dat de hoogte van het uiteinde der buis boven de kwikoppervlakte in het bakje minder dan 76 duim bedraagt, dan vult zich de buis geheel met kwikzilver. Houdt men ze weder overeind, dan ontstaat terstond weder er boven in eene ledige ruimte.

De hier vermelde proef werd het eerst door Torricelli (1643) genomen. Men noemt daarom de met kwikzilver gevulde buis veelal de *buis van Torricelli*, terwijl men aan de ledige ruimte boven het kwikzilver den naam geeft van het *luchtledig van Torricelli*.

De drukking, door de lucht op een ligchaam uitgeoefend, zal volgens de bovenvermelde wetten zich in alle rigtingen uiten, en evenredig zijn met de oppervlakte van dat ligchaam. Door de volgende eenvoudige proef, wordt de eerste dier eigenschappen voldoende opgehelderd. Men schenkt een bierglas tot den rand toe vol water, en legt er dan een papier op, zoodanig dat het overal met den rand van het glas in aanraking is, en er zich geene luchtbellen onder bevinden. Men kan het glas dan omkeeren, zonder dat het water er uitvloeit. De oorzaak hiervan is de drukking der lucht, welke onder tegen het papier drukt, terwijl daarboven slechts eene kleine waterkolom staat. De tweede eigenschap wordt opgehelderd door verschillende proeven met de luchtpomp, welke wij zullen vermelden na de beschrijving van dat werktuig. De invloed van de luchtdrukking op het menschelijk ligchaam schijnt bij eene oppervlakkige beschouwing buitengewoon groot te moeten zijn. Daar de oppervlakte van het ligchaam van een volwassen mensch ongeveer $1\frac{1}{2}$ vierkante el bedraagt, zal toch de geheele drukking 15500 pond bedragen; dat wij hiervan niets bemerken moet daaraan worden toegeschreven, dat ook de lucht, die zich binnen in het ligchaam bevindt, eene gelijke spanning uitoefent.

89. **Barometer.** — Wanneer men naast de buis met kwikzilver eene in strepen verdeelde schaal plaatst, dan zal men bevinden, dat de kwikkolom kleiner wordt, wanneer men zich op hoogergelegene plaatsen begeeft. Dit is natuurlijk, want in dat geval zal de luchtkolom, welke met de kwikkolom evenwigt maakt, ook kleiner wezen, en de drukking, zoo als wij reeds hebben opgemerkt, geringer. Maar ook, wanneer men de buis op dezelfde plaats laat, zal men kunnen waarnemen, dat de hoogte der kwikkolom veranderlijk is. Hieruit volgt dus, dat de drukking der lucht aan veranderingen is blootgesteld; en daar zij steeds door de kwikkolom worden aangewezen, zal men deze dus kunnen gebruiken, om telkens de drukking of de zwaarte der lucht te bepalen. Men heeft daarom aan de buis van Torricelli den naam van *barometer* gegeven. Dit gebruik maakt evenwel, zoo de bepalingen met eenige naauwkeurigheid zullen geschieden, eene gemakkelijker inrigting noodzakelijk. Men heeft dan ook te dien einde verschillende soorten van barometers vervaardigd, waarvan wij de voornaamste kortelijk beschrijven zullen.

90. **Bak-barometers.** — Daar de hoogte van de kwikkolom moet gemeten worden van de oppervlakte van het kwikzilver in het bakje afgerekend, is het wenschelijk, dat deze oppervlakte aan geene veranderingen onderhevig zij. Daar evenwel, als de kwikkolom grooter wordt, of, zoo als men het doorgaans noemt, de barometer rijst, een gedeelte van het kwikzilver zich

uit het bakje in de buis begeeft, terwijl daarentegen bij eene daling het omgekeerde plaats heeft, zoo zal de oppervlakte in het bakje ook gedurig veranderen. Men kan deze veranderingen geringer maken, door aan het bakje grootere afmetingen te geven. De eenvoudigste bakbarometers hebben doorgaans den vorm van fig. 99. De buis is op een houten plankje bevestigd; haar benedenste uiteinde is onder de oppervlakte van het kwikzilver in het bakje *m* gedompeld, dat, om stof en vuiligheid verwijderd te houden, van boven gesloten is; alleen door eene kleine opening *a* kan de lucht vrijelijk hare drukking op de kwikoppervlakte uitoefenen. In plaats van eene geheel verdeelde schaal van onderen af, is slechts eene in duimen en onderdeelen verdeelde koperen plaat op het plankje bevestigd, ter hoogte waar zich doorgaans de bovenste rand van de kwikkolom bevindt. De cijfers zijn zoodanig bij de verdeelingen geplaatst, dat zij den afstand aanduiden boven den gemiddelden stand van het kwikzilver in het bakje. Men zal ligt inzien, dat men met zoodanig werktuig geene zeer naauwkeurige waarnemingen kan doen; daar bij een hoogeren of lageren stand van den barometer het nulpunt van de schaal niet meer overeenkomt met de oppervlakte van het kwikzilver in den bak.

Fig. 99.



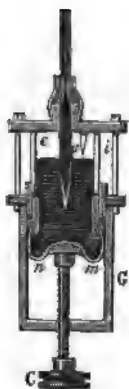
Fig. 100.



Om in dit gebrek te voorzien, heeft Fortin aan den bak-barometer de gedaante gegeven, die in fig. 100 is voorgesteld; hij heeft hem bovendien zoodanig ingerigt, dat hij gemakkelijk kan vervoerd en dus als reis-barometer gebruikt worden. De glazen buis is geheel in eene koperen buis ingesloten, waarin alleen bij B, ter hoogte waar zich het bovenste gedeelte van de kwikkolom doorgaans bevindt, aan twee tegenovergestelde kanten spleten gemaakt zijn, waardoor men hare oppervlakte duidelijk kan zien. Ter zijde zijn verdeelingen aangebragt; eene schuif A wordt zoodanig geplaatst, dat men haren

onderkant juist gelijk met den bovenrand van de kwikkolom ziet. Doorgaans is aan deze schuif een nonius verbonden, die in staat stelt om met grootere naauwkeurigheid de verdeelingen op de schaal af te lezen.

Fig. 101.



De standvastigheid van de kwikoppervlakte in den bak wordt verkregen door de inrigting, die in fig. 101 op eene grootere schaal is afgebeeld. Het kwikzilver bevindt zich in een glazen cilinder *ei*, met een zeemlederen bodem. Deze glazen cilinder is stevig vastgemaakt in een koperen cilinder G, in welks bodem zich eene schroef C bevindt, waarmede men den lederen bodem *mn* van den eigenlijken kwikbak kan op en neêr schroeven. Hierdoor kan men den stand der oppervlakte van het kwikzilver in den bak veranderen, en dus ook steeds tot een zelfde punt, namelijk het nulpunt van de schaal, brengen. Dit punt wordt aangewezen door de punt van eene naald *a*, in den bovenwand van den koperen cilinder bevestigd. De lucht heeft toegang tot den bak door eene kleine opening, die ergens in het deksel van den cilinder gemaakt is. Wil men den barometerstand waarnemen, dan begint men met door middel van de schroef C het kwikzilver in den bak tot de naald te brengen; of dit punt juist bereikt is, zal het gemakkelijkst blijken, wanneer men nagaat of de punt van de naald, en die van haar beeld in de spiegelende kwikoppervlakte juist aan elkander komen. Is dit geschied, dan verplaatst men de schuif A met den nonius totdat zij met de bovenste oppervlakte van het kwikzilver in de buis gelijk staat, en leest de verdeeling op de schaal af. De geheele barometer kan aan een ring C worden opgehangen; men zal ligt inzien, dat een naauwkeurig vertikale stand een vereischte is.

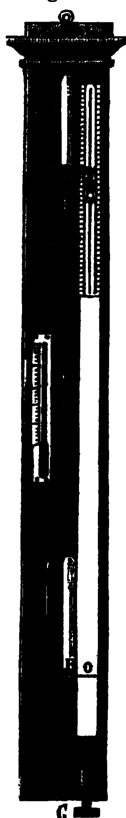
Wij hebben gezien, dat kwikzilver in glazen buizen, ten gevolge van de capillariteit, eene neêrdrukking ondergaat, die afhankelijk is van den diameter der buis. Men zal dus hiervan rekenschap moeten houden, en daarvoor bij de waargenomene hoogte eene correctie moeten optellen. Daar de capillaire neêrdrukking bij wijdere buizen geringer is, zal de aan te brengen correctie alsdan ook geringer wezen; doch de hoeveelheid kwikzilver is dan grooter, en de barometer dus zwaarder en moeijelijker te behandelen. Is de binnenste middellijn van de buis 5 strepen, dan bedraagt de correctie voor de capillariteit 1.53 streep; voor eene middellijn van 1 duim is zij 0.44, voor eene middellijn van $1\frac{1}{2}$ duim slechts 0.14 streep.

Daar het kwikzilver zich even als alle andere ligchamen door de warmte uitzet, zal de kwikkolom bij hoogere temperatuur grooter zijn dan bij lagere, zonder echter zwaarder te zijn. Om verschillende waarnemingen met elkander te

kunnen vergelijken, moeten dus de hoogten der kwikkolommen tot eene zelfde temperatuur herleid worden, waarvoor men doorgaans 0° neemt. Wij zullen later zien, welke correctie daarvoor moet worden aangebragt.

91. **Hevel-barometers.** — Een ander soort van barometers zijn de zoogenaamde hevel-barometers, waarvan fig. 102 eene afbeelding geeft. De in het kwikbakje gedompelde buis is hier vervangen door eene buis, die van onderen opwaarts gebogen is; het lange gedeelte is van boven gesloten, terwijl de korte arm eene opening heeft, waardoor de lucht kan binnen komen. Wanneer de lange arm van zoodanigen barometer geheel met kwikzilver gevuld is, en dan in den door de figuur aangewezen stand wordt gehouden, zal bij A weder een luchtledig ontstaan, terwijl in den korten arm het kwikzilver rijst tot B. De beide armen vormen nu als 't ware twee vaten, die met elkander gemeenschap hebben; bij A is geene drukking, in B daarentegen drukt de geheele dampkring; de luchtdrukking wordt dus aangewezen door eene kwikkolom, gelijk aan de hoogte van het punt A boven B. Men moet dus aan beide deze punten den stand op eene verdeelde schaal aflezen, en deze beide getallen van elkander aftrekken; men heeft dit echter gemakkelijk gemaakt, door de geheele schaal beweegbaar te maken. Door middel van eene schroef C, die zich onderaan bevindt, wordt de schaal zoodanig gesteld, dat haar nulpunt gelijk komt met de oppervlakte B van het kwikzilver in den korten arm. De verdeeling op de schaal, die gelijk komt met de oppervlakte van het kwikzilver bij A, duidt dus onmiddelijk de naauwkeurige hoogte van de kwikkolom aan. Bij sommige hevel-barometers is de schaal vast, doch de buis beweegbaar; hoewel het voorgestelde doel, om namelijk slechts op ééne plaats de verdeeling te behoeven af te lezen, daardoor evenzeer bereikt wordt, zijn die met eene beweegbare schaal en eene stevig op het plankje vastgemaakte buis te verkiezen.

Fig. 102.



Het voordeel der hevel-barometers bestaat daarin, dat zij minder kwikzilver vereischen dan de bak-barometers, en dus minder zwaar zijn. Voor de capillariteit behoeft geene correctie aangebragt te worden (1), mits men slechts zorg draagt,

(1) Wel te verstaan, indien de gebogene oppervlakte bij A in het luchtledig en die bij B, waarop de lucht drukt, denzelfden vorm hebben, hetgeen nog niet geheel uitgemaakt is.

dat de lange en de korte arm even wijd zijn. De correctie voor de temperatuur is dezelfde als bij den bakbarometer. Voor naauwkeurige waarnemingen is de schaal in halve strepen verdeeld, en bovendien aan de schuif een nonius aangebragt, door middel van welken men de hoogte der kwikkolom tot $\frac{1}{20}$, $\frac{1}{50}$ of somtijds wel tot $\frac{1}{100}$ van eene streep naauwkeurig kan bepalen; in dat geval bevinden zich gewoonlijk kleine vergrootglazen of mikroskopen bij A en B, waarvan de eene onveranderlijk op het nulpunt der schaal gerigt is, terwijl de andere met de schuif met nonius op en neêr bewogen kan worden. De hevel-barometer geeft naauwkeuriger resultaten, dan de barometer van Fortin, omdat men gemakkelijker het nulpunt der schaal met de oppervlakte van het kwikzilver bij B kan gelijkstellen, dan de stalen punt *a* (Fig. 101) juist met de kwikoppervlakte in den bak in aanraking brengen.

De meeste barometers, waarvan men zich in het dagelijksch leven bedient, zijn even als de hevel-barometers van onderen omgebogen, doch de korte arm eindigt in een wijder peervormig vat; rijzingen of dalingen van het kwikzilver in den langen arm zullen dus slechts geringen invloed uitoefenen op den stand van het kwikzilver in den wijderen korten arm. Daar echter de schaal vast is, en dus het nulpunt slechts overeenkomt met den gemiddelden stand van het kwikzilver in den korten arm, zijn deze evenmin als de gewone bakbarometers voor naauwkeurige waarneming geschikt.

Fig. 103.



Somtijds treft men ook nog wel oudere barometers aan, die met een wijzer voorzien zijn. Bij deze is om de as O (Fig. 103) van den wijzer eene koord geslagen, aan wier eene uiteinde zich een stalen gewigtje bevindt, dat op de kwik in den korten arm drijft, terwijl aan het andere uiteinde een gewigtje P bevestigd is, dat iets ligter is. Daalt nu het kwikzilver in de lange buis, dan klimt het in den korten arm juist evenveel, wanneer namelijk beide even wijd zijn. Het gewigtje gaat dan mede naar boven, en door de zwaarte van P draait de wijzer linksom. Evenzoo zal een rijzen van den barometer eene tegenovergestelde beweging van den wijzer ten gevolge hebben. De geheele toestel is doorgaans in eene soort van kast ingesloten; alleen de wijzer is zigtbaar.

92. Aneroïde-barometer, en barometer van Bourdon. — Bij de hierboven beschrevene barometers wordt de drukking der lucht steeds aangewezen door de hoogte eener

kwikkolom. Men kan hare veranderingen echter ook op eene andere wijze aanduiden. Bij den *aneroïde-barometer* van Vidi (1847) wordt gebruik gemaakt van de veêrkracht van eene dunne metalen plaat. Fig. 104 stelt dien toestel op ongeveer $\frac{1}{3}$ der gewone grootte in doorsnede voor. A is eene cilindervormige koperen doos, die zoo volkomen mogelijk luchtledig gemaakt is. Door de drukking der buitenlucht zal het dunne en veêrkrachtige deksel BC naar binnen gebogen worden, en deze doorbuiging zal aanzienlijker zijn, naarmate de drukking der lucht sterker is. Midden op het deksel is eene staaf D bevestigd, die door een stiftje verbonden is met een hefboom EF, wiens steunpunt zich in E bevindt, en die op een spiraalveêr O rust. Het uiteinde F van dezen hefboom is door een staafje verbonden met een anderen hefboom GHI, wiens steunpunt in H is, en aan wiens uiteinde I eene koord is bevestigd, welke om de spil van den wijzer KL geslagen is. Men zal gemakkelijk inzien, dat eene uiterst geringe beweging van het deksel BC eene zeer merkbare verplaatsing van den wijzer zal ten gevolge hebben, aan wiens spil bovendien een klein spiraalveêrtje is aangebragt, waardoor de koord steeds gespannen gehouden wordt; was dit niet het geval, dan zoude bij vermeerdering van luchtdrukking de wijzer zich niet verplaatsen. Het geheel is in eene doos MN besloten, op wier deksel verdeelingen zijn aangebragt, die door den wijzer aangewezen worden; den geheelen toestel kan men aan eenen ring ophangen. Boven de wijzerplaat is eene glazen plaat aangebragt, om den toestel tegen stof te beveiligen. Om hem juist te stellen moet men hem met eenen gewonen kwik-barometer vergelijken. De ondervinding heeft geleerd, dat de aanwijzingen van den aneroïde-barometer vrij naauwkeurig zijn; de toestel is gemakkelijker te behandelen, dan een kwik-barometer, en de stand doet niets tot de aanwijzingen, welke bovendien onafhankelijk zijn van den warmtegraad. Men doet echter wel, hem van tijd tot tijd met eenen kwik-barometer te vergelijken, daar de veêrkracht van het metalen deksel BC op den duur wel eenige wijziging kan ondergaan.

Fig. 104.

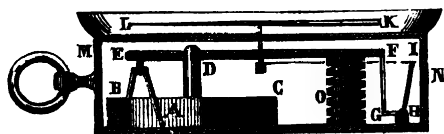


Fig. 105.



Onlangs heeft Bourdon nog een anderen metaalbarometer zamengesteld. Deze, in fig. 105 afgebeeld, bestaat uit eene gebogene metalen buis A, waarvan de doorsnede de gedaante van eene zeer in de lengte uitgerekte O heeft. Zoodanige buis heeft de eigenschap, dat zij door eene inwendige drukking een minder gebogenen vorm aanneemt, en door eene sterkere uitwendige drukking daarentegen zich meer kromt. De buis A is luchtledig gemaakt en luchtdigt gesloten, en is in haar midden op eene metalen plaat bevestigd. Vermeerdert nu de drukking der buitenlucht, dan kromt zich de buis sterker, en de beide uiteinden C en D komen dus digter bij elkander. Bij vermindering van drukking wordt de afstand van C tot D grooter. Door die uiteinden door middel van twee staafjes aan een hefboompje *ab* te bevestigen, dat met de as van den wijzer verbonden is, zal de beweging op dezen worden overgebragt. Het spiraalveêrtje *c* dient om den wijzer te doen terugkeeren naar het midden van de verdeelingen, die op de wijzerplaat zijn aangewezen. Het spreekt van zelf, dat, om zoodanigen barometer te stellen en de verdeelingen aan te brengen, eene vergelijking met een gewonen barometer noodig is.

93. **Dampkring, veranderingen van den barometerstand** — Volgens de wetten van het evenwigt der luchtsoorten moet de dampkring de aarde overal als een bolvormig omhulsel omringen. De op alle punten der aarde nagenoeg gelijke barometerstand bevestigt dit; op hooger gelegene plaatsen is deze lager, omdat de luchtkolom dan ook minder hoog is. De hoogte van den dampkring laat zich bezwaarlijk proefondervindelijk bepalen, omdat men de middelen niet heeft om zoodanige hoogten te bereiken, en omdat de digtheid der lucht aan de uiterste grenzen zoo gering moet zijn, dat zij aan de waarneming geheel zoude ontsnappen. Waarnemingen, op verschillende hoogten gedaan, hebben echter de wet leeren kennen, volgens welke de digtheid afneemt, en doen zien, dat de dampkring zich waarschijnlijk niet verder uitstrekt, dan 50 mijlen (kilometers) van de oppervlakte der aarde. Zijne hoogte bedraagt dus slechts $\frac{1}{130}$ van den straal der aarde.

Men bedient zich dikwijls van den barometer om aanzienlijke hoogten, zoo als van bergen en dergelijke, te meten. Te dien einde behoeft men slechts op twee plaatsen gelijktijdige barometer-waarnemingen te doen; uit het verschil in stand zal men het verschil in hoogte kunnen berekenen. Wij kunnen hier omtrent den aard dier berekeningen niet in bijzonderheden treden, maar bepalen ons met op te geven, dat, wanneer B de barometerstand is op de laagst gelegene plaats, en b die op de hoogste, beide bij dezelfde temperatuur en in ellen uitgedrukt, het verschil in hoogte eveneens in ellen vrij naauwkeurig wordt aangewezen door de formule $h = 18382\ (log.\ B - log.\ b)$.

Wij hebben reeds de opmerking gemaakt, dat de stand van den barometer op eene zelfde plaats aan veranderingen onderhevig is. De grootte dier veranderingen hangt echter veel af van de plaats, waar men zich bevindt. Onder den evenaar bedraagt het verschil tusschen den hoogsten en laagsten stand niet meer dan 6 strepen; het neemt toe, naarmate men zich van den evenaar verwijdert, zoodat het op onze geographische breedte wel 60 strepen kan bedragen. De laagste stand, dien men bij ons waarneemt op de oppervlakte van de zee, bedraagt 725 strepen, de hoogste 785. Digter bij de pool is dit verschil nog aanzienlijker. De afwijkingen zijn doorgaans in den winter grooter, dan in den zomer; aanzienlijke afwijkingen bepalen zich meestal niet tot eene of weinige plaatsen, maar doen zich tegelijk over eene grootere uitgestrektheid lands (zooals bijv. geheel Europa) gevoelen. Wanneer op eene plaats de waarnemingen gedurende vele achtereenvolgende jaren worden voortgezet, en men daaruit de gemiddelden berekent, dan kan men in den aldus verkregenen jaarlijkschen gang wel eenige regelmatigheid ontdekken. Voor Nederland is volgens berekeningen van Wenckebach (1841) en Buijs Ballot (1857) de gemiddelde barometerstand aan de oppervlakte der zee 761 strepen. In den jaarlijkschen gang komen vier maxima en vier minima voor; de eerste hebben plaats in het midden van Januarij, het begin van Maart, het laatst van Junij, en het laatst van September; de minima vallen in het midden van Februarij en van April, in het begin van Augustus en in het midden van November. Het verschil tusschen den gemiddelden jaarlijkschen hoogsten en laagsten stand bedraagt niet meer dan 3 strepen.

Ook in den dagelijkschen gang van den barometer is zekere regelmatigheid op te merken. Onder den evenaar is deze zoo groot, dat men zich, volgens von Humboldt, zelfs van den barometer zoude kunnen bedienen, om het uur van den dag aan te wijzen. Men merkt daar twee maxima en twee minima in elke 24 uren op; het eerste en hoogste maximum heeft plaats des morgens omstreeks half tien, het tweede des avonds tegen half elf. De laagste stand valt omstreeks 4 uur 's namiddags, een tweede doch minder laag minimum heeft plaats des nachts na 4 uur. Op noordelijker breedtegraden is deze regelmatigheid niet te erkennen, omdat de afwijkingen gewoonlijk veel aanzienlijker zijn. Berekent men echter de gemiddelden uit vele waarnemingen, dan bevindt men, dat ook in onze streken zoodanige regelmatigheid bij den dagelijkschen gang is op te merken, en dat de beide maxima plaats hebben omstreeks $9\frac{1}{2}$ uur 's morgens, en 10 uur 's avonds; de minima te 4 uur 's avonds en half vier 's nachts. De tijd van het jaar is echter ook hierop niet zonder invloed.

Aangaande de oorzaken van de gedurige veranderingen van de luchtdrukking

is weinig bekend. Op den jaarlijkschen en dagelijkschen gang oefent stellig de zon invloed uit. De grootere afwijkingen schijnen in een naauw verband met de rigting en kracht van den wind. Men kan aannemen, dat in westelijk Europa bij Noordewind en Oostewind de barometer doorgaans hooger staat, dan bij Zuidewind of Westewind. Daar in onze streken deze beide laatstgenoemde winden, van den zeekant komende, doorgaans vochtig weder aanbrengen, zoo neemt men veelal bij droog weder een hoogen barometerstand waar, bij regen en sterken wind een lagen stand. Daarom vindt men ook doorgaans op barometers, voor dagelijksch gebruik bestemd, de woorden: *zeer droog*, *vast weder*, *schoon weder*, *veranderlijk*, *regen of wind*, *sterke regen of wind*, *storm* aangeteekend. Het woord *veranderlijk* staat dan bij den gemiddelden barometerstand van 761 strepen (1), en de andere daarboven en daaronder.

Men beschouwt den barometer dikwijls als een werktuig, waardoor het weder vooruit aangewezen of voorspeld wordt. De kennis aangaande het verband tusschen de veranderingen van den barometerstand en het weder, dat volgen moet, is nog zoo gering, dat men hiervoor volstrekt geene vaste regels kan opgeven. Alleen wanneer men den stand van den barometer in verband brengt met de rigting en kracht van den wind, en met den vochtigheidstoestand van den dampkring, kan men tot enkele resultaten komen, die eenige waarschijnlijkheid hebben. De meerdere ontwikkeling, in de laatste jaren aan de waarneming der verschijnselen van den dampkring gegeven, doet echter de hoop koesteren, dat men ook hier weldra tot eenige vaste grondbeginselen zal geraken.

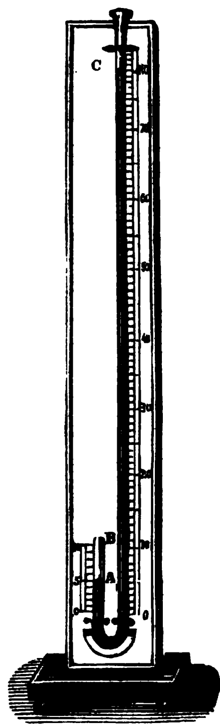
94. **Wet van Mariotte.** — Uit de vermelde proef (85) om de spankracht van de lucht aan te toonen blijkt, dat die kracht grooter wordt, als de lucht tot een kleiner volume zamengeperst wordt. Wij zullen nu het verband nagaan, dat er bestaat tusschen die drukking en het volume.

Wij nemen te dien einde eene lange omgebogene buis BC (Fig. 106), waarvan de korte arm AB bij B luchtdigt gesloten is, en bevestigen die in vertikalen stand op een plankje, dat zoowel bij den korten als bij den langen arm in duimen verdeeld is, en wel zoodanig, dat het nulpunt aan beide kanten even hoog gelegen is. In deze buis schenkt men van boven bij C een weinig kwikzilver, tot dat het in beide armen even hoog staat. In den korten arm zal lucht ingesloten zijn; zoolang het kwik in beide armen even hoog staat, zal de spanning van die lucht gelijk zijn aan die van de damp-

(1) Is de plaats, waar de barometer opgehangen wordt, veel hooger gelegen dan de oppervlakte der zee, dan mag men dit niet buiten rekening laten. Te Maastricht bijv., dat ruim 50 ellen hooger ligt, is de gemiddelde barometerstand nagenoeg 5 str. lager, dus 756 str. Het woord *veranderlijk* zoude dus aldaar bij dat cijfer moeten geschreven staan.

kringslucht. (1) Men leest op de verdeelde schaal het door de lucht bij B ingenomene volume af. Vervolgens schenkt men in de lange buis kwikzilver bij; men ziet, dat ook in den korten arm de vloeistof rijst, doch veel langzamer. Men gaat met het bijschenken voort, tot de lucht in B tot een tweemaal kleiner volume zamengeperst is. Stond bijv. bij het begin de vloeistof tot het nulpunt en bedroeg het volume dus 10, dan voegt men er zoolang kwikzilver bij, tot zij tot het cijfer 5 staat. Gaat men dan na, hoe hoog het kwikzilver in de lange buis staat, dan zal men bevinden, dat het verschil in hoogte in den langen en den korten arm 76 duim bedraagt, dus gelijk is aan de drukking van eene atmospheer. Op de oppervlakte van het kwikzilver bij C drukt echter bovendien de buitenlucht; op een punt in de lange buis, even hoog als de oppervlakte van het kwikzilver in den korten arm gelegen, wordt dus eene drukking van twee atmospheren uitgeoefend. De lucht in B ondervindt dus ook eene drukking van twee atmospheren, en wordt daardoor tot de helft van haar oorspronkelijk volume zamengeperst. Indien de lengte van de buis C het toelaat, schenkt men er nog meer kwikzilver bij, en zal dan bevinden, dat om de lucht bij B tot een derde gedeelte van haar volume zamen te persen, eene drukking van drie atmospheren vereischt wordt. Dit leert ons, dat *de volumen van een gas zich omgekeerd verhouden als de drukkingen, waaraan het blootgesteld is.* De wet wordt gewoonlijk naar haren uitvinder de *wet van Mariotte* genoemd, die ze in 1670 bekend maakte; somtijds ook noemt men ze de wet van *Boyle*, die ook omstreeks denzelfden tijd (1660) deze eigenschap ontdekte.

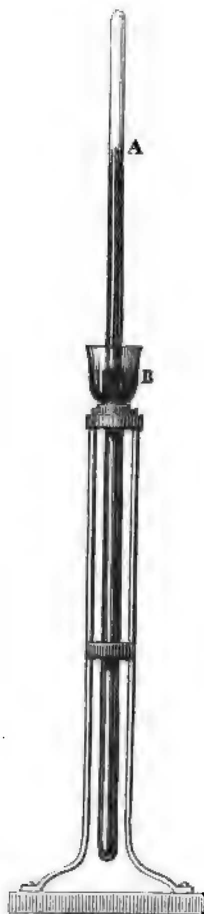
Fig. 106.



Door middel van den beschrevenen toestel kan men de wet van Mariotte aantoonen voor drukkingen, grooter dan die van den dampkring. Dat zij echter ook geldt voor geringere drukkingen, kan opgehelderd worden door den in fig. 107 voorgestelden toestel. Eene aan het eene uiteinde geslotene gla-

(1) Verkielijk is het, dat zich aan het uiteinde B eene ijzeren kraan bevindt, waardoor de buis kan gesloten worden; men kan het dan gemakkelijk, door wat lucht te laten ontwijken, zoo regelen, dat het kwikzilver aan beide kanten tegelijk bij het nulpunt staat.

Fig. 107.



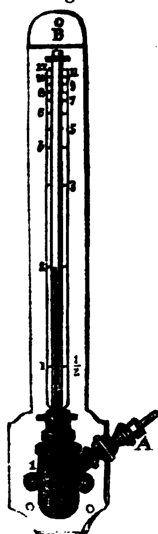
zen buis wordt gedeeltelijk met kwikzilver gevuld, en daarna omgekeerd in eenen diepen bak, liefst van ijzer, daar dit stevig is, en niet zoo als de andere metalen door het kwikzilver aangetast wordt, gedompeld. Men brengt de buis dan in zoodanigen stand, dat de vloeistof er binnen en er buiten even hoog staat; de lucht, die er binnen in gebleven is, zal dan eene gelijke spanning als de buitenlucht hebben. Nadat men door middel van op de buis aangebragte verdeelingen het volume van de opgeslotene lucht bepaald heeft, ligt men ze een weinig op. De lucht zal dan wel een grooter volume innemen, maar in de buis zal tevens eene kwikkolom AB blijven staan. Daar de spanning van de lucht in de buis, vermeerderd met de kwikkolom AB, alsdan evenwigt maakt met de drukking der buitenlucht op de oppervlakte van het kwikzilver in den bak, zal de spanning der lucht in de buis worden aangewezen door eene kwikkolom van 76 duim, verminderd met de kwikkolom AB. Stellen wij, om dit door een voorbeeld duidelijk te maken, dat het oorspronkelijk volume der lucht 30 bedraagt, en dat de buis zoover opgeligt wordt, dat het volume 40 wordt; men zal dan bevinden, dat het kwikzilver in de buis 19 duim hooger staat dan daar buiten. De spanning van de lucht in de buis maakt dan evenwigt met eene kwikkolom van $76-19=57$ duim. Men ziet dus, dat ook in dit geval de volumen omgekeerd evenredig zijn met de drukkingen, en dat dus ook voor geringere drukkingen de wet van Mariotte als geldig kan beschouwd worden. Daar de digtheid van een gas omgekeerd evenredig moet zijn aan het volume, dat het inneemt, kan men de wet van Mariotte ook uitdrukken door te zeggen, dat de digtheid van een gas evenredig is aan de drukking, waaraan het is blootgesteld. Door middel van deze wet kan men dus de digtheid van een gas berekenen onder eene bepaalde drukking, als zijne digtheid onder eene andere drukking bekend is.

De beschrevene toestellen zijn weinig geschikt om de wet voor zeer sterke drukkingen te onderzoeken. In lateren tijd hebben echter zoodanige onderzoekingen met meer zamengestelde werktuigen plaats gehad; tot de belangrijkste behooren die van Arago en Dulong (1831), welke de juistheid der

wet tot eene drukking van 27 atmospheren aantoonden. Uit latere onderzoekingen van Regnault (1847) is echter gebleken, dat voor zeer aanzienlijke drukkingen de wet van Mariotte niet volkomen doorgaat. Zijne onderzoekingen strekten zich uit tot dampkringslucht, stikstof, waterstof en koolzuur, en toonden aan, dat voor waterstofgas de zamenpersbaarheid bij hooge drukkingen eenigzins vermindert, terwijl zij bij de andere vermelde gassoorten toeneemt. Bij het koolzuur is de afwijking vrij sterk, ook zelfs dan, wanneer de drukking nog lang niet voldoende is, om het tot den vloeibaren staat te doen overgaan. Hetzelfde was reeds vroeger uit onderzoekingen van Pouillet gebleken voor andere niet permanente gassoorten, zooals stikstofoxydul, koolwaterstofgas, zwaveligzuur en ammoniakgas, die alle meer dan de lucht zamenpersbaar zijn. Voor permanente gassoorten zal men evenwel zonder eenige merkbare fout, zelfs bij aanzienlijke drukkingen, de wet van Mariotte als eene genoegzaam naauwkeurige benadering kunnen blijven beschouwen. Hierbij valt echter nog op te merken, dat die wet alleen dan geldt, wanneer de temperatuur niet verandert; later zullen wij zien, dat de warmtegraad eenen aanzienlijken invloed uitoefent op de spanning van gassen en dampen.

95. **Manometers.** — Het is dikwijls noodig, dat men de spankracht van gassen of dampen naauwkeurig bepalen kan; de wet van Mariotte geeft daartoe de middelen aan de hand. De in fig. 108 afgebeelde toestel, bekend onder den naam van *manometer met zamengeperste lucht*, bestaat uit eene van boven geslotene stevige glazen buis, wier benedenste uiteinde in een luchtdigt gesloten bakje met kwikzilver gedompeld is; eene buis A is bestemd, om de ruimte boven het kwikzilver in het bakje in gemeenschap te brengen met de ruimte, waarin zich het gas of de damp bevindt, waarvan men de spankracht bepalen wil. In de glazen buis B bevindt zich lucht; wordt dus de ruimte in het bakje met de buitenlucht in verband gebragt, dan zal het kwikzilver in de buis een bepaalden stand aannemen; gewoonlijk rigt men het zoodanig in, dat het kwikzilver dan in de buis en in het bakje even hoog staat. Is de spankracht van het gas nu zoodanig, dat de kwik tot de halve hoogte der buis klimt, en de opgeslotene lucht dus tot de helft van haar oorspronkelijk volume zamengeperst wordt, dan zal die spankracht, volgens de wet van Mariotte, twee atmospheren bedragen. Het cijfer 2 wordt dus op de helft van de buis

Fig. 108.

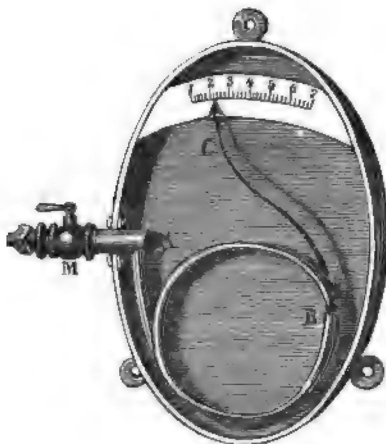


geplaatst; om gelijke reden zal het cijfer 3 op $\frac{2}{3}$, het cijfer 4 op $\frac{3}{4}$, enz., alle van onderen afgerekend, moeten geplaatst worden. De hoogte van het kwikzilver in de buis wijst dus terstond de drukking in atmospheren aan.

Deze manometer heeft echter het nadeel, dat bij aanzienlijkere drukkingen de verdeelingen op de buis steeds kleiner worden, en dat dus de aanwijzingen dan ook minder naauwkeurig zijn. Daarom bedient men zich, als het op meerdere naauwkeurigheid aankomt, van een manometer, waarvan de buis van boven open is, doch die overigens op dezelfde wijze in ingerigt. De schaal is dan in duimen verdeeld; de kwikkolom in de buis, vermeerderd met de drukking van den dampkring, zal dan evenwigt maken met de spankracht van het gas. Is bijv. in zoodanigen manometer de kwikkolom 0.76 el, dan is de spankracht van het gas twee atmospheren; eene kolom van 1.14 el wijst eene spanning van $2\frac{1}{2}$ atmospheer aan. Voor aanzienlijke spanningen heeft men echter eene zeer lange glazen buis noodig, wier gebruik ook aan vele zwarigheden onderhevig is.

Men bedient zich tegenwoordig dikwijls van een manometer, door Bourdon uitgedacht, en op hetzelfde beginsel berustende, als zijn boven beschrevene barometer (92), alleen met dat onderscheid, dat de metalen buis AB (Fig. 109) langer is, en dat door de kraan M het gas of de damp, waarvan men de spanning bepalen wil, binnen in de buis gelaten wordt. Het uiteinde A is vast; door het meerder of minder ontrollen der buis zal zich dus het vrije uiteinde B bewegen, en tegelijk met dit de wijzer C, die dan op eene verdeelde schaal de drukking in atmospheren of onderdeelen aanwijst. De verdeelingen zijn gemaakt, door dezen manometer met een gewonen te vergelijken.

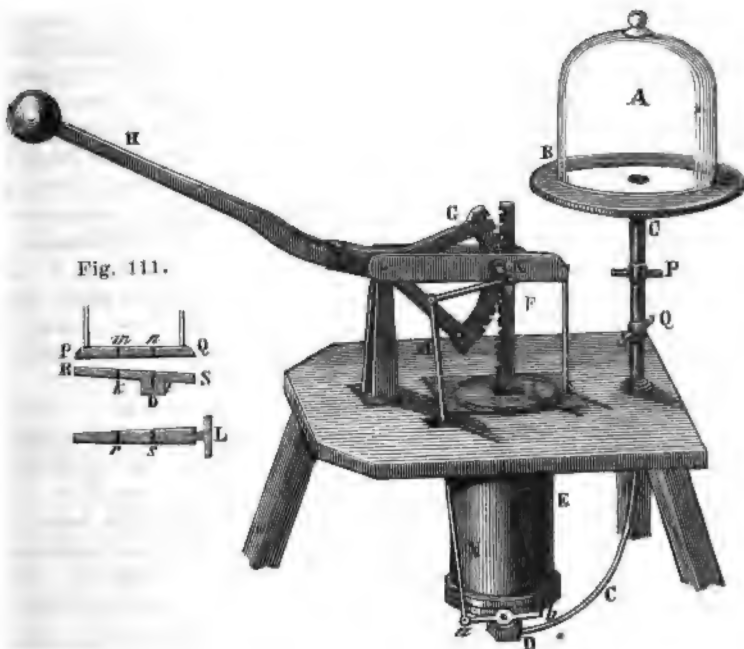
Fig. 109.



96. **Luchtpomp.** — De luchtpomp is een toestel, waarvan men zich bedient, om de lucht zooveel mogelijk in eene beslotene ruimte te verdunnen. Zij werd in 1650 uitgevonden door Otto von Guericke te Magdeburg, doch heeft sedert vele veranderingen ondergaan. Men onderscheidt de tegenwoordig gebruikt wordende in twee hoofdsoorten, die met kranen en die met

kleppen. Wij zullen van beide eene beschrijving geven, en beginnen te dien einde met eene door Becker vervaardigde luchtpomp met kraan, waarvan fig. 110 eene afbeelding is. A is eene glazen klok, met zeer zuiver afgesle-

Fig. 110.



pene randen, zoodat zij luchtdigt sluit op de glazen plaat B, in welker midden zich de opening eener buis C bevindt. Het andere uiteinde D dezer buis komt uit in eenen cilinder E, waarin door middel van den hefboom HG een aan de getande staaf F verbondene zuiger kan op en neêr bewogen worden. In den zuiger bevindt zich geene opening of klep, en hij sluit volkomen tegen den cilinderwand aan; het deksel I van den cilinder is niet naauwsluitend, zoodat de lucht vrijen toegang heeft tot den bovenkant van den zuiger. Onder aan den cilinder bevindt zich eene kraan, waardoor men de ruimte van den cilinder onder den zuiger in gemeenschap kan brengen met de buis C en de klok A, of met de buitenlucht. Fig. 111 stelt eene doorsnede voor van den bo-

dem van den cilinder in de rigting van de kraan; PQ is de eigenlijke bodem, waarin zich twee openingen m en n bevinden. Onder aan den bodem is eene even groote plaat aangeschroefd, waaraan zich het gedeelte D bevindt, waarin de buis C uitkomt. In deze plaat zijn twee openingen k en l, welke zich juist onder m en n bevinden. In de kegelvormige uitholling tusschen PQ en RS wordt de kraan L gestoken, welke op twee plaatsen, in r en s, doorboord is. Deze openingen zijn zoodanig aangebragt, dat, als de kraan ingestoken is, r zich tusschen m en k bevindt, en s tusschen n en l. Zij liggen echter niet in een zelfde vlak, zoodat in éénen stand van de kraan r gemeenschap daarstelt tusschen m en k, dat is, tusschen den cilinder en de buitenlucht, terwijl dan tevens de gemeenschap tusschen n en l is afgesloten; wordt de kraan L een weinig omgedraaid, dan zal daarentegen de opening s juist tusschen n en l komen; alsdan is er gemeenschap tusschen den cilinder en de klok, terwijl de gemeenschap tusschen den cilinder en de buitenlucht is afgebroken. Door pennetjes die zich op G bevinden, ontvangt de as K eene geringe omdraaijing, die door middel van de staaf MN aan de kraan wordt medegedeeld, en haar dus steeds in den vereischten stand brengt. Bij P en Q zijn twee kranen, waarvan de eene dient om de klok geheel af te sluiten, en de andere, om de buitenlucht weder er binnen te laten.

De werking van dezen toestel laat zich gemakkelijk verklaren. Stellen wij dat de zuiger zich onder in den cilinder bevindt, en dat door de kraan de buitenlucht is afgesloten. Wordt de zuiger opgetrokken, dan zoude daaronder in den cilinder een luchtledig ontstaan; de lucht, die zich in A en C (Fig. 110) bevindt, heeft echter vrijen toegang, en verspreidt zich dus in den geheelen cilinder; zij zal dus eene geringere spanning en digtheid verkrijgen. Is V het volume van de klok A en de buis C, v dat van den cilinder, P de oorspronkelijke spanning, dan zal de spanning P_1, als de zuiger zich boven in den cilinder bevindt, zijn $P_1 = \frac{V}{V+v} P$. Op dit oogenblik wordt de kraan door middel van de staaf MN omgedraaid, zoodat de gemeenschap tusschen de klok en den cilinder ophoudt, terwijl deze laatste met de buitenlucht in verband gebragt wordt. Drukt men dus den zuiger naar beneden, dan wordt de lucht die zich in den cilinder bevindt, uitgedreven, terwijl die in de klok dezelfde spanning P_1 behoudt. Zoodra de zuiger op den bodem is aangekomen, komt ook de kraan weder in haren eersten stand; wordt de zuiger dan weder opgetrokken, dan zal de reeds verdunde lucht in A en C zich ook in den cilinder begeven, en dus nog meer verdund worden. Hare spanning zal dan zijn $P_2 = \frac{V}{V+v} P_1 = \left(\frac{V}{V+v}\right)^2 P$. Nadat de kraan omgedraaid is,

drukt men den zuiger weder naar beneden, en zoo voort. Bij elken slag zal er eene nieuwe verdunning plaats hebben, en het laat zich op grond van het voorgaande gemakkelijk inzien, dat na den n^{den} slag de spanning $\left(\frac{V}{V+v}\right)^n P$ zal wezen. Daar deze grootheid nooit nul kan worden, blijkt het, dat men door de luchtpomp geen volkomen luchtledig kan verkrijgen, maar slechts eene luchtverdunning, die men echter door lang pompen zeer aanzienlijk maken kan.

Sluit de zuiger niet volkomen tegen den bodem van den cilinder aan, dan zal onder in dezen nog eenige lucht blijven van gelijke spanning als de buitenlucht; hetzelfde is het geval met de openingen *m* en *n*, waardoor de lucht heengaat, als de zuiger naar beneden gedrukt wordt, terwijl zij er zich niet weder uit verwijdert, dan om zich met de verdunde lucht te vermengen, en dus op de verdunning eenen schadelijken invloed uit te oefenen. Daarom noemt men die ruimte ook doorgaans de *schadelijke ruimte*, en het is ligt in te zien, dat men dientengevolge eene grens verkrijgt voor de luchtverdunning, welke onmogelijk kan overschreden worden. Verschillende inrigtingen, uitgedacht om den invloed van de schadelijke ruimte te verminderen, gaan wij hier stilzwijgend voorbij.

Fig. 112.

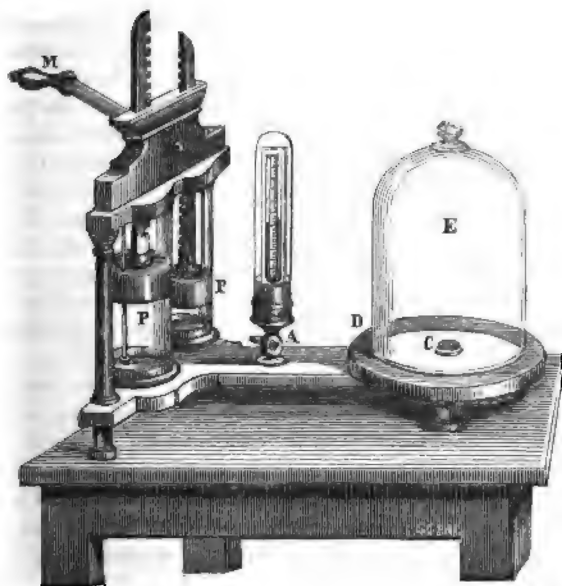
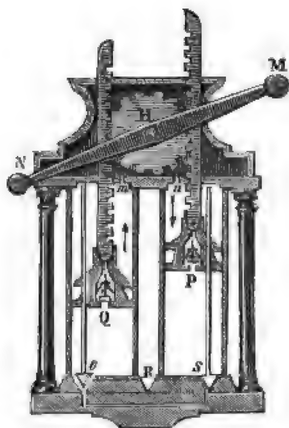


Fig. 112 stelt eene luchtpomp met kleppen en met twee cilinders voor; deze zijn van koper of zooals tegenwoordig veel geschiedt, van stevig glas vervaardigd; in elken beweegt zich een zuiger P, voorzien van eene getande staaf. Deze beide

staven grijpen in een rad H (Fig 113), dat zich tusschen beide bevindt, en door middel van eene dubbele kruk MN in eene heen en weergaande draaijende beweging gebragt wordt. Gaat de eene zuiger opwaarts, dan beweegt zich de andere benedenwaarts. Onder van de beide cilinders loopt eene buis naar het midden C van de plaat D, waarop eene klok E geplaatst wordt. De zuigers P en Q (Fig. 113) zijn in het midden doorboord en elk met eene klep voorzien, die zoodanig is ingerigt, dat de opening door de drukking der buitenlucht gesloten wordt, als de zuiger zich opwaarts beweegt, zooals Q, terwijl bij eene nederwaartsche beweging de klep in den zuiger opgeligt wordt, zoodra de spanning der lucht daaronder aanzienlijker is, dan die der buitenlucht. Door kleine openingen *m* en *n* in de deksels van de cilinders heeft de buitenlucht steeds vrijen toegang tot de bovenste ruimte der cilinders. In hunnen bodem bevinden zich twee kegelvormige openingen *o* en *s*, die door stoppen van denzelfden vorm luchtdigt kunnen gesloten worden. Deze stoppen zijn bevestigd aan het uiteinde van staven, die iets korter zijn dan de hoogte van de cilinders, en volkomen luchtdigt door de zuigers gaan; van de kegelvormige openingen *o* en *s* gaan kanalen naar de buis, die naar de klok voert. De werking van deze luchtpomp verschilt alleen in zooverre van de zoo even beschrevene, dat de gemeenschap van de cilinders met de buitenlucht hier plaats heeft door eene opening in den zuiger, en niet door eene opening in den bodem. Stellen wij, dat de zuiger Q zich op den bodem van den eenen, en P zich boven in den anderen cilinder bevindt. Door het omdraaijen der kruk MN wordt Q opgeligt en gaat P neêr; door de opgaande beweging van Q wordt de staaf met de stop medegenomen, en dus *o* geopend; een oogenblik daarna stoot echter het bovenste uiteinde van de staaf tegen het deksel van den cilinder, en de staaf blijft in den in onze afbeelding aangewezenen stand. De klep in den zuiger blijft gesloten, en de lucht, die zich in de klok bevond, zal zich dus ook in den geheelen linkschen cilinder verspreiden. De gemeenschap tusschen de klok en den regtschen cilinder was afgebroken, want zoodra de zuiger P naar beneden ging, werd de opening *s* door de stop gesloten, en ontweek dus de lucht door de klep in dien zuiger,

Fig. 113.



welke opgeligt werd. Wordt de kruk M N in tegengestelde rigting omgedraaid, dan zal volkomen dezelfde werking zich herhalen, alleen met dat onderscheid, dat nu de regtsche cilinder gebruikt wordt, om de lucht in de klok te verdunnen. Met eene dubbele luchtpomp, zooals de hier beschrevene, zal dus de verdunning schielijker gaan, daar met den opgaanden slag de lucht uit den eenen cilinder gepompt wordt, en met den neêrgaanden slag uit den anderen. Bovendien is de beweging aan de kruk gemakkelijker, daar men hier minder tegenstand heeft te overwinnen dan bij eene enkele luchtpomp; want als men den zuiger Q moet opligten tegen de drukking der lucht in, dan helpt tevens de drukking van de lucht op den zuiger P, waaronder zich slechts verdunde lucht bevindt, en evenzoo omgekeerd.

Het is dikwijls noodig, dat men bij het gebruik van eene luchtpomp kan nagaan, tot welken graad de lucht verdund is. Men kan dit doen, wanneer men door eene opening in de plaat, waarop de klok rust, eene opene glazen buis brengt, wier benedenste opening in een kwikbakje gedompeld is. Naarmate de lucht meer verdund wordt, zal het kwikzilver hooger in de buis klimmen. Was er een volkomen luchtledig, dan zoude de kwikkolom even hoog wezen, als die van een barometer; het verschil tusschen deze zal dus de spanning der lucht aanduiden. Bij de meeste luchtpompen is echter een toestel aangebragt, welke op eene eenvoudiger wijze die spanning aanwijst. Aan de buis, welke van de cilinders naar de klok voert (Fig. 112), is eene zijdelingsche buis aangebragt, welke door eene kraan in gemeenschap kan gebragt worden met een glazen klokje, waarin zich een omgebogene glazen buis bevindt, met twee even groote armen, waarvan de eene gesloten, de andere open is. Hunne lengte bedraagt gewoonlijk ongeveer 2 palmen. In die glazen buis bevindt zich kwikzilver, dat, daar de geslotene arm luchtledig is, dezen geheel vullen zal. Vermindert nu de spanning in de klok E en dus ook in het klokje A, dat daarmede gemeenschap heeft, dan vermindert de drukking op het kwikzilver in den open arm; zoodra deze geringer wordt, dan die, welke wordt aangewezen door de kwikkolom in den gesloten arm, dan begint het kwikzilver daarin te dalen en een luchtledig te vormen, en dus in den open arm te klimmen. Het verschil tusschen de kwikkolommen in den gesloten en den openen arm duidt dan de spanning van de lucht in de klok aan. Gaat men voort met het uitpompen, dan zal men bevinden, dat dit verschil hoe langer hoe geringer wordt; bij de beste luchtpompen bedraagt het toch altijd nog één of twee strepen. Deze toestel wordt gewoonlijk de *verklikker* genoemd.

97. **Eenige proeven met de luchtpomp.** — Wij zullen, alvorens verder te gaan, eenige proeven vermelden, welke wij vroeger achterwege

lieten, omdat de luchtpomp toen nog niet verklaard was. Dat de buitenlucht eene aanzienlijke drukking uitoefent, gevoelt men, wanneer men tracht de klok van de plaat af te trekken, nadat de lucht er uit gepompt is. Het best echter kan men die aantoonen door middel van de zoogenaamde *Magdeburger halve bollen*, door den uitvinder der luchtpomp, Otto von Guericke, uitgedacht en in fig. 114 afgebeeld. Het zijn twee holle halve bollen, welke zeer naauwkeurig aan elkander sluiten; nadat zij aan elkander gevoegd zijn, en de kraan geopend is, worden zij op de opening C (Fig. 112) van de luchtpomp geschroefd. Pompt men er de lucht zooveel mogelijk uit, sluit men dan de kraan A, en schroeft men den toestel weder van de luchtpomp af, dan zal eene zeer aanzienlijke kracht noodig zijn, om de beide halve bollen van elkander te rukken. De grootte dier kracht kan men gemakkelijk berekenen, als men de middellijn van den bol kent. Zij deze bijv. een palm, dan is de oppervlakte 314 vierkante duimen; en daar de drukking der lucht ruim 1 pond op iederen vierk. duim bedraagt, zoo zal de drukking op den bol meer dan 314 pond bedragen. Is dus de lucht van binnen nagenoeg uitgepompt, dan is er eene kracht van meer dan 300 pond noodig, om ze van elkander te trekken.

Fig. 114.



Neemt men een glas zonder bodem, waarover men eene blaas gespannen heeft, zooals in fig. 115, en pompt men de lucht daaronder weg, dan zal de blaas door de drukking der buitenlucht geheel hol gaan staan, en ten laatste, als de lucht sterk verdund is, barsten; het plotselinge indringen van de lucht veroorzaakt een hevigen slag. Bij deze proef moet men den verklikker afsluiten, daar door het plotseling stijgen van het kwikzilver de glazen buis gevaar loopt van te breken.

Fig. 115.



Legt men onder de klok van de luchtpomp eene blaas, die slechts gedeeltelijk met lucht gevuld en daardoor rimpelig is, dan zal na weinige slagen de daarin opgeslotene lucht eene veel sterkere spanning verkrijgen, dan de lucht in de klok; de blaas zet zich daardoor uit. Laat men echter de lucht weder in de klok, dan krimpt zij terstond weder in.

Dat alle ligchamen in het luchtledige even schielijk vallen, is reeds vroeger vermeld. Om dit door eene proef aan te toonen behoeft men slechts eenige voorwerpen, bijv. een muntstukje, een veêrtje, en dergelijke in eene lange buis te doen, waaruit men de lucht zooveel mogelijk uitpompt; keert men de

buis om, dan komen alle tegelijk op den bodem aan. Brengt men in eene klok, welke luchtledig is, rook binnen, dan zal deze op den bodem blijven rusten; dat hij in de lucht naar boven trekt, komt alleen daarvan, dat hij ligter is dan de lucht.

Plaatst men een glas met water met een stuk krijt, marmer, broodsuiker of iets dergelijks onder de klok, dan ziet men bij de verdunning der lucht overal uit het vaste ligchaam lucht oprijzen, welke in de poriën bevat was, en, nu de lucht daar buiten geringere spanning verkrijgt, naar buiten komt. Ook aan de wanden van het vat komen vele luchtbellen te voorschijn, waaruit blijkt, dat zich tusschen deze en de vloeistof lucht bevinden moet.

Brengt men een dier onder de klok van de luchtpomp, dan zal het weldra sterven, indien de lucht er uitgepompt wordt; lucht is dus voor het leven noodig. Niet alle sterven echter even schielijk; visschen leven veel langer in het luchtledige dan vogels of zoogdieren. Houdt men de hand op het in fig. 115 afgebeelde glas, na er de blaas afgenomen te hebben, dan zal men na weinige slagen met de luchtpomp gedaan te hebben, de hand niet meer kunnen wegnemen, wegens de drukking der buitenlucht. Bovendien zal het gedeelte van de hand, dat met de verdunde lucht in aanraking is, door de spanning der lucht, die zich binnen in het weefsel bevindt, sterk opzwellen, en zal zelfs indien men de verdunning voortzet, bloed door de poriën van de huid naar buiten dringen.

98. **Luchtperspomp.** — Even als men zich van de luchtpomp bedient, om de lucht in eene bepaalde ruimte te verdunnen, kan men een dergelijken toestel gebruiken, om de lucht in eene bepaalde ruimte zamen te persen. Eene lucht-perspomp kan dezelfde inrigting hebben als eene luchtpomp, mits slechts de kleppen zich juist in tegenovergestelde rigting openen, zoodat die in den zuiger gesloten blijft bij de nederwaartsche beweging, doch bij de opwaartsche zich opent door de drukking der buitenlucht, terwijl bij die in den bodem juist het tegenovergestelde plaats heeft als bij de luchtpomp. Heeft men eene luchtpomp met kraan, zooals de in fig. 110 afgebeelde, dan is het voldoende de kraan in eenen anderen stand te plaatsen, om haar in eene perspomp te veranderen. Bij de daar afgebeelde behoeft men slechts de kraan half om te draaijen, en de staaf MN dus aan het andere uiteinde van het staafje *ab* vast te maken, om haar in eene perspomp te veranderen. Daar bij luchtpompen met kleppen deze verandering niet zoo gemakkelijk geschieden kan, zijn dus die met kranen om deze reden te verkiezen. Het vat, waarin men de lucht wil zamenpersen, moet stevig aan de buis C verbonden

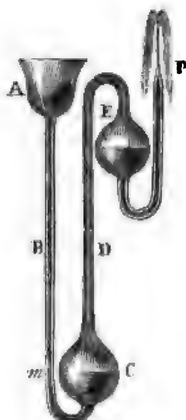
zijn, daar het anders door de spanning der zamengeperste lucht terstond zoude opgeligt worden.

99. **Hero's flesch en Hero's fontein.** — Men kan de spanning van zamengeperste lucht duidelijk maken, door ze te laten drukken op eene vloeistof, welke uit eene opening kan uitstroomen. In fig. 116 is A een metalen vat, gedeeltelijk met water gevuld, door welks bovenwand eene buis gaat, die nagenoeg tot den bodem reikt, en door eene kraan B kan gesloten worden. Wanneer men de lucht daarin heeft zamengeperst, dan zal, zoodra de kraan geopend is, het water door de sterke drukking der lucht op zijne oppervlakte uit het vat gedreven worden, en uit de opening des te hooger opspringen, naarmate de lucht binnen in meer zamengeperst is. Zoodra die lucht dezelfde spanning teruggekregen heeft als de buitenlucht, houdt het uitvloeijen op. Men kan deze proef eenvoudiger nemen, door op een fleschje, dat men ongeveer half met water gevuld heeft, eene naauwsluitende kurk te doen, waardoor men vooraf een glazen buisje heeft gestoken. Blaast men dan lucht in het glazen buisje, dan zal men de luchtbellen door het water heen zich in de ruimte daarboven zien begeven, alwaar de lucht dus zamengeperst zal worden. Zoodra men ophoudt met blazen, springt het water uit het buisje in de hoogte. Deze toestel wordt naar haren uitvinder gewoonlijk *Hero's flesch* of *Hero's bol* genoemd. Plaatst men den toestel onder de klok van de luchtpomp, dan zal het water er uitspringen, zoodra de verdunning van de lucht in de klok begonnen is. Het is nu niet door de zamenpersing van de lucht in de flesch, maar door de verdunning van die, welke er buiten is, dat het water uitvloeit; men zal echter ligt inzien, dat het eigenlijk op hetzelfde neêrkomt.

Fig. 116.



Fig. 117.



Aan denzelfden Hero (120 j. v. Chr.) is men eene meer zamengestelde fontein verschuldigd, wier werking eveneens op de spanning van zamengeperste lucht berust. Zij bestaat uit eene buis van den in fig. 117 afgebeelden vorm; de waterkolom ABC drukt de lucht in de buis D te zamen, en de drukking van deze zamengeperste lucht op de oppervlakte van het water in E doet het bij P uitsprin-

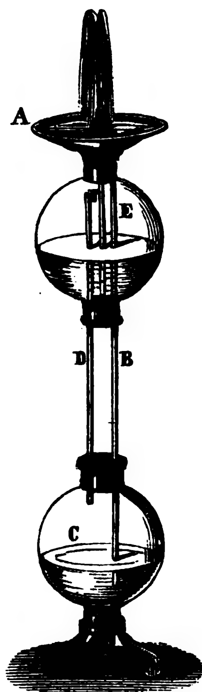
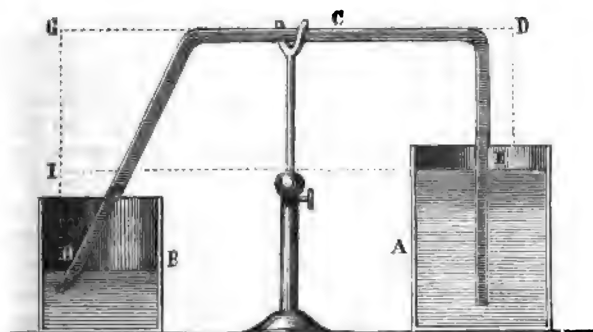


Fig. 118.

gen, en zelfs hooger dan de oppervlakte van het water in A; want daar de drukking der lucht op C en E dezelfde is, zoo is het juist, als of zich op E nog eene waterkolom A*m* bevond. De lucht in D dient dus eigenlijk slechts, om de drukking van die kolom onveranderd van C naar het hooger gelegene punt E over te brengen. Men kan de Hero's fontein ook sierlijker inrigten, zooals bijv. in fig. 118 is voorgesteld. De bak A komt overeen met den trechter A van fig. 117, de buis B reikt tot onder in het benedenste vat, en laat het water uit A door; de buis D verbindt de lucht in het benedenste vat met die in het bovenste, terwijl het water uit dit door de buis F opspringt.

100. **Hevel.** — De hevel is eene omgebogene buis, wier beide uiteinden in twee verschillende vaten gedompeld zijn. Heeft men de buis, alvorens ze in de beide vaten te plaatsen, met de vloeistof gevuld, dan zal deze door den hevel uit het vat, waarin zij het hoogste staat, stroomen naar het andere, totdat de waterspiegel in beide even hoog is. De reden hiervan laat zich gemakkelijk inzien. Op de oppervlakte der vloeistof in A (fig. 119), zoowel als op die in B, werkt de drukking der lucht; beschouwt men nu een vochtdeeltje in de buis bij C, dan zullen op dit twee krachten werken; in de rigting CG ondervindt het eene drukking, gelijk aan die van den dampkring, verminderd met eene waterkolom DE; in de tegenovergestelde rigting CD daar-

Fig. 119.

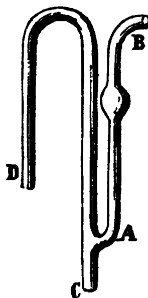


entegen eene drukking, aangewezen door de luchtdrukking verminderd met eene waterkolom GH. Het verschil dezer krachten is gelijk aan de drukking eener waterkolom IH, en het is dus met eene snelheid, door die drukking veroorzaakt, dat het vocht van A naar B door de buis stroomt. Bevindt zich het onderste uiteinde van den hevel niet onder den waterspiegel in B, dan loopt de vloeistof uit door de drukking eener waterkolom, aangeduid door de hoogte van den waterspiegel in A boven het benedenste uiteinde van den anderen arm van den hevel. Daar de waterkolom, die oorzaak is van het uitstroomen, hoe langer hoe kleiner wordt, zal ook de uitvloeijingssnelheid steeds geringer worden. Het uitstroomen houdt geheel op, zoodra de waterspiegel even laag als het vrije uiteinde is gedaald, of als het vocht in beide vaten evenhoog staat.

De drukking van de lucht is niet de onmiddelijke oorzaak van het uitstroomen bij den hevel; zij is dit slechts in zooverre, dat zij het stijgen van de vloeistof in de buis mogelijk maakt. In het luchtledige houdt een hevel dan ook op te werken. Evenmin zal hij kunnen werken, wanneer de waterkolom DE grooter is dan 10.33 el, dat is, aanzienlijker drukking uitoefent, dan de dampkring. In dat geval zoude in elke buis eene kolom van 10.33 el blijven staan, terwijl zich daarboven een luchtledig zoude vormen. Even min zal een hevel, hooger dan 76 duim, kunnen gebruikt worden om kwikzilver van een vat in een ander over te brengen.

Om den hevel te vullen, is het voldoende om aan het uiteinde te zuigen; daar hierdoor de lucht binnen in den hevel verdund wordt, klimt de vloeistof door de drukking der lucht op E in de buis. Is de vloeistof van zoodanigen aard dat het gevaarlijk of onaangenaam zoude zijn, zoo zij in den mond geraakte, dan kan men opzuigen door eene zijdelings aangebragte buis AB, zooals in fig. 120 is voorgesteld. Houdt men met den vinger de opening C gesloten, dan stijgt het vocht in D; zoodra het boven in de buis is gekomen, trekt men mond en vinger terug, en de uitvloeijing begint.

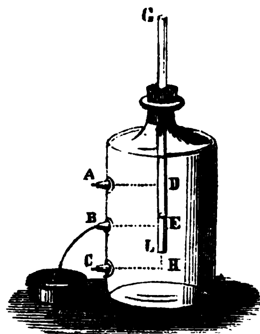
Fig. 120.



101. **Flesch van Mariotte.** — Door de flesch van Mariotte verstaat men eene gewone flesch, in wier wand eenige naauwe openingen A, B, C (Fig. 121) zijn gemaakt, door stopjes gesloten; terwijl door de kurk eene opene glazen buis gaat, die meer of minder diep in het water kan gedompeld worden, waarmede de flesch gevuld is. Stellen wij dat de flesch en de buis GL geheel gevuld zijn, en dat nu B geopend wordt; het water zal er uitstroomen, totdat de vloeistof in de buis staat tot een punt E even hoog als B gelegen; alsdan

is de drukking bij B, zoowel als bij E, gelijk aan de drukking van de buitenlucht, en er bestaat dus geen enkele reden meer, waarom de vloeistof zoude uitvloeijen, daar in den toestand van evenwigt de hydrostatische drukking bij alle vochtdeeltjes, die zich in eene zelfde horizontale laag bevinden, even groot zijn moet.

Fig. 121.



Opent men A, na B gesloten te hebben, dan ziet men bij A luchtbellen binnenkomen en zich boven in de flesch verzamelen, terwijl het water in de buis GL klimt, totdat het in deze even hoog staat als de opening A. Dit komt, omdat door het openen van A alle vochtdeeltjes, even hoog als A gelegen, eene drukking hebben gekregen, gelijk aan die der buitenlucht; de bovenoppervlakte van de vloeistof in de buis tracht dus ook zich tot eene gelijke hoogte te verheffen, hetgeen echter niet geschieden kan, zoo er niet door de eenige opening A lucht binnenkomt.

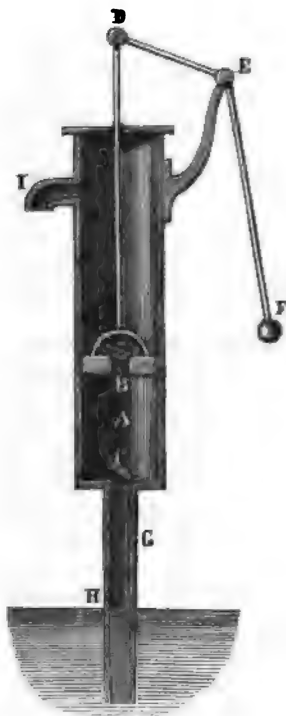
Opent men nu de opening C, lager dan het onderste uiteinde der buis GL gelegen, dan zal de vloeistof uitstroomen met eene snelheid, aangewezen door de formule $\sqrt{2gh}$, waarin h de hoogte is van de vloeistof in de buis boven C. Daar echter de vloeistof in GL zakt, zal die snelheid verminderen, totdat de buis geheel ledig is. Alsdan blijft het water echter uitvloeijen, terwijl door de buis GL luchtbellen binnenkomen, die zich boven in de flesch verzamelen. De uitstroomingssnelheid zal van dat oogenblik af standvastig zijn, en worden aangewezen door de formule $\sqrt{2g.HL}$. De reden hiervan laat zich gemakkelijk inzien. De drukking van buiten tegen de opening C is die van den dampkring; die van binnen is die van den dampkring, in L werkende, vermeerderd met de wate.kolom LH. Het is dus alleen dit kolommetje, dat oorzaak is van het uitvloeijen.

De flesch van Mariotte kan om deze reden gebruikt worden bij proeven voor hydrodynamica, waarbij eene standvastige uitvloeijingssnelheid noodig is. Het eenige hinderlijke daarbij is, dat telkens als een luchtbel bij L binnenkomt, de uitstroomende straal als 't ware een schok krijgt.

102. **Waterzuigpomp.** — De werking der pompen, waarvan men zich bedient om water in de hoogte te voeren, berust geheel op de eigenschappen der luchtdrukking. Die, waarvan men het menigvuldigste gebruik maakt, is de zuigpomp, in fig. 122 voorgesteld. A is eene cilindervormige buis, gewoon-

lijk pompbuis genoemd, waarin zich een zuiger B kan op en neer bewegen. Deze zuiger is doorboord en van eene klep voorzien; het uiteinde van den zuigerstang is aan een hefboom DEF bevestigd, die den naam van pompzwengel draagt. Onder in de pompbuis is eene klep C, het *hart* van de pomp genaamd, waardoor de gemeenschap met de tot in het water reikende buis G kan afgebroken of daargesteld worden. De lucht heeft tot de oppervlakte H van het water vrijen toegang.

Fig. 122.



Stellen wij dat de zuiger zich op den bodem van de pompbuis, of althans digt daar boven bevindt. Wordt hij dan door middel van den zwengel opgetrokken, dan wordt de lucht daaronder in A verdund, en dus de klep C geopend. De drukking der lucht op het water binnen in de buis G is dus geringer dan die daar buiten; het zal dus in G klimmen, naarmate de zuiger hooger opgetrokken wordt, en door de klep C in de pompbuis komen. Wordt nu de zuiger, door den zwengel F op te ligten, weder onder naar de pompbuis gedrukt, dan zal door de drukking der lucht, die zich er onder bevindt, de klep in den zuiger geopend worden, terwijl C door het water in A gesloten wordt. Tot de oppervlakte van het water gekomen, blijft de zuiger zijnen weg voortzetten, daar het water door de opening in den zuiger heendringt, zoolang deze naar beneden gedrukt wordt. Is de zuiger onder aangekomen, dan zal zijn klep zich weder sluiten, en door het water, dat zich nu er boven bevindt, gesloten blijven, als hij weder opwaarts getrokken wordt. Bij die opwaartsche beweging zoude echter onder den zuiger een luchtledig moeten ontstaan; dit kan niet, daar op H de buitenlucht drukt. Het water zal dus in G en A tegelijk met den zuiger klimmen, en de klep C openen. Bij de opwaartsche beweging van den zuiger wordt het water, dat zich er boven bevindt, mede opgevoerd, en kan dus door de zijdelingsche buis I uitvloeijen. Bij iederen volgenden slag zal weder volkomen hetzelfde plaats hebben.

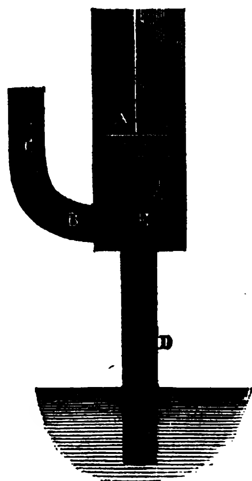
Sloten de zuiger en de kleppen volkomen, dan zoude, wanneer men met pompen ophoudt, het water onder den zuiger in A en in de buis G moeten blijven staan. Daar echter doorgaans die sluiting slechts onvolmaakt is, en dus de buitenlucht in A doordringt, zal het water weldra weder zakken tot H, en moet men dus, als men de pomp weêr aan den gang wil maken, op de zoo even verklaarde wijze beginnen met er de lucht uit te pompen. Is de buis G lang, dan zullen verscheidene slagen noodig zijn, alvorens he water in het pompbuis A komt.

De buis G kan echter niet onbepaald lang genomen worden. Was de afstand van den zuiger tot H grooter dan 10.33 el, dan zoude het water niet tot den zuiger kunnen komen, daar eene waterkolom van 10.33 el evenwigt maakt met de drukking der lucht, en het dus onmogelijk is, door middel van deze drukking het water hooger op te voeren.

Wegens de onvolmaakte sluiting bij de pompen, waarvan men zich in het dagelijksch leven bedient, rigt men ze doorgaans zoodanig in, dat de afstand van den zuiger tot den waterspiegel niet meer dan 8 el bedraagt.

Wil men de drukking berekenen, die de zuiger bij zijne opgaande beweging ondervindt, dan moet men in aanmerking nemen, dat op het bovenvlak van den zuiger de dampkring drukt, benevens de waterkolom van den zuiger af tot aan de opening I; tegen den onderkant van den zuiger wordt echter ook eene drukking, en wel van beneden naar boven uitgeoefend, gelijk aan de drukking van den dampkring, verminderd met de waterkolom van den waterspiegel H af, tot onder tegen den zuiger. Het verschil van deze beide drukkingen is dus de kracht, die men moet overwinnen, als men den zuiger optrekt; zij zal gelijk zijn aan eene waterkolom, tot grondvlak hebbende het oppervlak van den zuiger, en tot hoogte den vertikalen afstand van de opening I boven den waterspiegel H. Indien het water dus uit eene aanzienlijke diepte moet opgepompt worden, dan kan men de uit te oefenen kracht verminderen, door den zuiger kleiner en de verhouding tusschen de hefboomarmen DE en EF zoo gunstig mogelijk te maken.

Fig. 123.

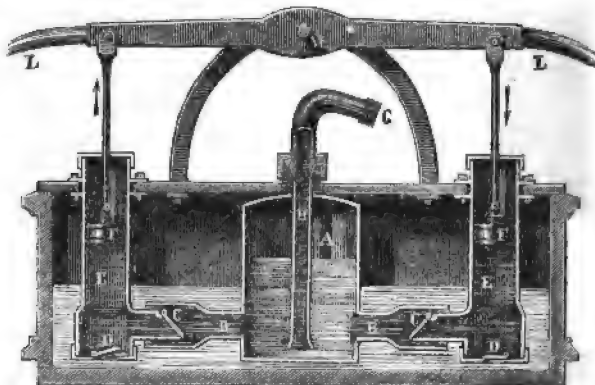


103. **Zuig- en perspomp.** — Moet men het water tot eene grootere hoogte brengen, dan bedient men zich van de zuig- en perspomp, die, wat de inrigting aangaat, slechts weinig van de gewone zuigpomp verschilt.

De zuiger A (Fig. 123) is niet doorboord, maar in eene zijdelingsche buis B, welke onder aan de pompbuis is aangebragt, bevindt zich eene klep C. Wordt nu de zuiger A opgetrokken, dan zal even als bij de zuigpomp het water in de buis D klimmen. Is het water boven de klep E gekomen, en wordt de zuiger A nu naar beneden gedrukt, dan worden daardoor de lucht en het water in de zijdelingsche buis B geperst, en de klep C wordt opgeligt. Zoodra de zuiger onder in de pompbuis is gekomen, en dus de drukking op het water ophoudt, sluit zich de klep C door het water, dat zich er boven bevindt. Door dan den zuiger A op te trekken, komt er weder meer water in de pompbuis; zoodra de zuiger boven is gekomen, sluit zich E, en door de nederwaartsche beweging wordt eene nieuwe hoeveelheid water in de buis B opgeperst. Men moet hierbij in aanmerking nemen, dat de afstand van den zuiger tot den waterspiegel, even als bij de zuigpomp, minder dan 10.33 el moet bedragen. De buis B echter kan men zoo lang maken als men verkiest; maar naarmate de waterkolom daarin hooger wordt, zal echter de drukking op den zuiger bij zijne nederwaartsche beweging aanzienlijker worden. Bij de zuigpomp is daarentegen bij de beweging van boven naar beneden geen andere tegenstand te overwinnen, dan die, welken de zuiger ondervindt van het door zijne klep stroomende water.

104. **Brandspuit.** — Eene belangrijke toepassing van de drukking van

Fig. 124.



zamengeperste lucht en van de pompen vinden wij bij de brandspuit, in fig. 124 in doorsnede voorgesteld. E E zijn twee pompbuizen, die van onderen geheel in het water staan, en waarin de zuigers F F op en neer bewogen

worden door middel van de hefboomen L L, welke in M hun gemeenschappelijk steunpunt hebben; de lange armen dezer hefboomen zijn in de afbeelding niet geteekend. Onder in de pompbuizen zijn kleppen D D, en ter zijde twee andere kleppen C C. Het zijn dus zuig- en perspompen, waardoor het water in den cilinder A geperst wordt, en wel om beurten door de beide pompen. In dezen cilinder bevindt zich lucht, die dus door den toevoer van het water zamengeperst wordt, en op de oppervlakte van het water eene drukking veroorzaakt, waardoor het in de buis H klimt, en zelfs bij G met kracht uitgeperst wordt. Bij G wordt de slang der brandspuit vastgemaakt, waardoor men den waterstraal ter verlangde plaatse brengen kan. De cilinder A, die eigenlijk, wat de uitwerking aangaat, overeenkomt met de Hero's flesch (99), draagt den naam van *windketel.*

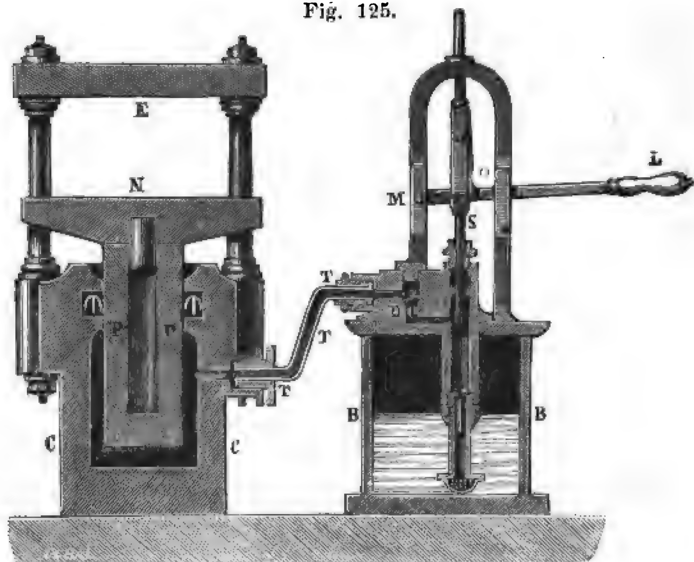
Men zal ligt inzien, dat het niet noodig is, dat eene brandspuit twee pompbuizen heeft; ook met ééne zal men eene dergelijke uitwerking verkrijgen, doch de hoeveelheid water, die in den windketel geperst wordt, zal dan ook slechts de helft bedragen. Bovendien zal bij eene dubbele werking de straal bij G steeds met nagenoeg gelijke kracht uitstroomen, terwijl bij enkele werking deze kracht telkens zal verminderen, als de zuiger in de pomp wordt opgetrokken, en dus geen water in den windketel geperst wordt.

105. **Hydrostatische pers.** — Wij hebben vroeger (58) reeds melding gemaakt van de hydrostatische pers, en zullen thans, nu wij de inrigting der pompen hebben leeren kennen, tot de beschrijving van dat werktuig overgaan.

Fig. 125 stelt het in doorsnede voor. Het bestaat uit twee hoofddeelen, eene zuig- en perspomp, en een met eene plaat N verbondene zuiger P, waarop de drukking wordt overgebragt. Uit een bak B, waarin zich water bevindt, wordt dit opgepompt, door den zuiger S op te ligten; drukt men dien neêr, dan sluit zich de klep I, terwijl het water, dat boven deze gekomen is, de klep D opent, en door de buis T naar den cilinder CC geperst wordt. De door den zuiger S op het water uitgeoefende drukking plant zich dan over op den grooteren zuiger P; daarop wordt dus eene drukking uitgeoefend evenveel maal grooter, als de oppervlakte van P grooter is dan die van S. Naarmate dus water van B naar C gepompt wordt, zal de zuiger P met de daaraan bevestigde plaat N naar boven geperst worden, en een voorwerp, dat zich tusschen deze en de vaste plaat E bevindt, sterk zamendrukken. De zuiger S wordt in beweging gebragt door een hefboom L. Wordt op het uiteinde van dezen hefboom eene kracht van 30 pond uitgeoefend, en is LM vijfmaal grooter dan OM, dan is de kracht, waarmede de zuiger S naar beneden wordt gedrukt, 150 pond. Is voorts de middellijn van P tienmaal grooter dan die

van S, en dus de oppervlakte 100 maal grooter, dan zal op den zuiger P of op de plaat N eene honderd maal sterkere drukking, dus van 15000 pond,

Fig. 125.



worden uitgeoefend. Een gedeelte hiervan gaat echter door wrijving verloren. Men ziet dus, dat men met de hydrostatische pers, ook wel naar haren uitvinder pers van Bramah (1796) genoemd, eene zeer aanzienlijke drukking kan uitoefenen. Men bedient zich ook van dit werktuig om zeer zware lasten op te ligten; dit is onder anderen geschied, toen de zware ijzeren kokerbrug tusschen Engeland en het eiland Anglesey op zijne pijlers is gelegd.

106. **Soortelijk gewigt van gassen.** — Door de luchtpomp zijn wij ook in staat gesteld, de digtheid van de lucht en andere gassoorten te bepalen. Men neemt daartoe een tamelijk grooten glazen bol, die met eene kraan voorzien is, en waaruit men de lucht zoo volkomen mogelijk uitgepompt heeft. Van dezen bol bepaalt men door middel van eene naauwkeurige balans het gewigt. Daarna laat men er lucht in, die men alvorens van waterdamp en andere gassen gezuiverd heeft, en weegt op nieuw. Het verschil der beide gewigten geeft het gewigt der lucht. Door vergelijking van gelijke volumen dampkringslucht en water heeft men bevonden, dat het soortelijk gewigt van

lucht, dat van water = 1 stellende, 0.001293607 bedraagt; 1 kan lucht weegt dus 1.293607 wigtjes (1). Om het soortelijk gewigt van andere gassoorten te vinden, voor welke men gewoonlijk dat van de lucht als eenheid aanneemt, heeft men den bol slechts op dezelfde wijze daarmede te vullen en te wegen, en dan het gewigt van die gassen door dat van een gelijk volume lucht te deelen.

Bij de bepaling van het soortelijk gewigt van gassen moet men echter acht geven op vele omstandigheden, die de uitkomst minder naauwkeurig kunnen maken. Vooreerst moet op de drukking acht gegeven worden, daar volgens de wet van Mariotte de digtheden daarmede evenredig zijn. In de tweede plaats is het onmogelijk den bol volkomen luchtledig te maken; men moet dus ook rekenschap houden van de drukking van de lucht of het gas, dat daarin blijft. Ook oefent de warmtegraad daarop een aanzienlijken invloed uit, daar de gassen zich bij verhooging van temperatuur uitzetten en dus eene geringere digtheid hebben. Wij kunnen echter hieromtrent in geene bijzonderheden treden, alvorens de leer der warmte behandeld te hebben. Wij moeten ons thans bepalen met eenvoudig mede te deelen, dat men gewoon is de digtheden te bepalen bij eene temperatuur van 0° en eene drukking van 76 duim.

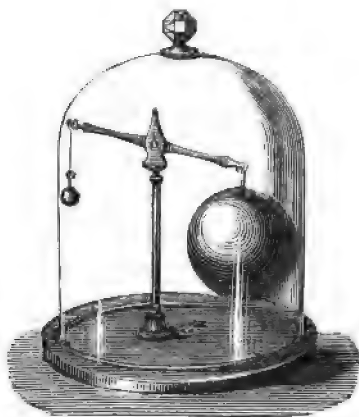
In de volgende tabel is het soortelijk gewigt van eenige gassoorten opgegeven, alsmede het gewigt van eene kan bij 0° en eene drukking van 76 duim. De onderzoekingen van Regnault (1847) zijn met eene groote naauwkeurigheid geschied, en verdienen het meeste vertrouwen.

Namen der gassen.	Digtheid.	Gewigt in wigtjes van 1 kan bij 0° C en 76 duim.	Waarnemers.
Lucht.	1.	1.293607	Regnault.
Zuurstof.	1.10563	1.430320	id.
Stikstof.	0.97137	1.256632	id.
Waterstof.	0.06926	0.089600	id.
Koolzuurgas.	1.52901	1.978034	id.
Ammoniakgas.	0.5967	0.77193	Biot en Arago.
Ligt koolwaterstofgas.	0.5596	0.72394	Thomson.
Zwaar koolwaterstofgas.	0.9816	1.26987	id.
Kooloxyd.	0.9569	1.23791	Cruikshanks.
Zwavelwaterstofgas.	1.1912	1.54102	Gay-Lussac.
Chloorwaterstofgas	1.2474	1.61372	Biot en Arago.
Zwaveligzuur.	2.2340	2.89006	Thénard.
Chloor.	2.4700	3.19537	id.

(1) Volgens Biot en Arago is het gewigt van 1 kan lucht 1.299541 wigtjes. Volgens latere naauwkeurige onderzoekingen van Regnault (1847) bedraagt dit gewigt voor Parijs 1.293187. Door middel van eene formule, door Regnault zelven opgegeven, heb ik voor Amsterdam (geog. breedte = 52°22′30″) gevonden 1.293607.

107. **Gewigtsverlies van ligchamen in de lucht.** — De wet van Archimedes (64), dat een ligchaam in eene vloeistof evenveel aan gewigt verliest, als de verplaatste vochtmassa weegt, geldt ook bij de weging in de lucht. De drukking der luchtdeeltjes wordt evenzeer in alle rigtingen uitgeoefend, en een ligchaam, dat van alle kanten door lucht omringd is, zal dus evenzeer eene drukking op zijne oppervlakte ondervinden, als wanneer het in eene vloeistof gedompeld is. De geringe digtheid der lucht maakt het gewigtsverlies minder merkbaar; men kan het echter zeer duidelijk aantoonen door den in fig. 126 afgebeelden toestel, welke bestaat uit twee bollen, die aan de uiteinden van eene zeer ligt bewegelijke balans zijn opgehangen. De kleine bol is massief, de groote hol; hun gewigt is zoodanig, dat zij in de lucht gewogen even zwaar zijn, en de evenaar dus een horizontalen stand aanneemt. Wordt deze toestel onder de klok van de luchtpomp geplaatst, en de lucht uitgepompt, dan ziet men weldra den grooten bol naar beneden gaan. De oorzaak is duidelijk. Bij de weging in de lucht was het eigenlijk niet het gewigt van de beide bollen, dat gelijk was, maar het gewigt van elken bol, verminderd met het gewigt van een even groot volume lucht. Het gewigtsverlies voor den grooten bol was dus aanzienlijker, en hij moet dus bij de weging in het luchtledige of in verdunde lucht zwaarder zijn dan de kleine bol.

Fig. 126.



108. **Luchtbollen.** — Het gewigtsverlies van een ligchaam in de lucht is, even als bij de vloeistoffen, eigenlijk eene vertikaal naar boven werkende resultante van de drukkingen der lucht op zijne oppervlakte. Is deze kracht geringer dan het gewigt van het ligchaam, dan zal het vallen; zijn beide even groot, dan zweeft het; is de opwaartsche drukking grooter, dan stijgt het ligchaam. Het is deze eigenschap, waarop de beweging der luchtbollen berust.

De eerste poging om luchtbollen te doen opstijgen geschiedde door de broeders Montgolfier (1783). Zij vervaardigden een bol van linnen, van binnen met papier beplakt, wiens middellijn 35 voet bedroeg, en die van onderen eene opening had, waaronder een sterk vuur gestookt werd, ten einde de

lucht in den bol te verwarmen en daardoor geringere digtheid te doen verkrijgen. De bol rees inderdaad tot eene hoogte van ongeveer 2000 ellen. Hetzelfde jaar herhaalde Charles de proef, doch vulde den luchtbol met waterstofgas, het ligtste van alle bekende gassoorten. Na hen werden deze proeven, die in hooge mate de belangstelling tot zich trokken, dikwijls herhaald; weldra waagden sommigen het ook, met den luchtbol mede in de hoogte te gaan. In den laatsten tijd heeft men echter in plaats van waterstofgas steeds van het minder kostbare koolwaterstofgas, waarvan men zich voor de verlichting bedient, gebruik gemaakt, om de luchtbollen te vullen. Daar dit gas zwaarder is dan waterstofgas, is het voor kleine ballons niet geschikt. De ballon zelf wordt doorgaans vervaardigd van taf, dat door een vernis van elastieke gom ondoordringbaar voor het gas gemaakt is. Een mand of schuitje, dat onderaan is bevestigd door middel van touwen, welke als een netwerk den geheelen ballon omgeven, is bestemd om de luchtreizigers mede te nemen, alsmede ballast, die uitgeworpen wordt, wanneer men hooger stijgen wil. Om te dalen, opent men eene klep, waardoor een gedeelte van het gas ontwijkt; daar de zwaardere lucht de plaats van dit inneemt, wordt de geheele bol zwaarder en zal zich dus benedenwaarts bewegen. Bij het vullen van den luchtbol moet men ook zorgen hem niet geheel te vullen; want had het gas gelijke spanning als de lucht, dan zoude, als de luchtbol in hoogere luchtlagen komt, waar de drukking geringer is, de sterkere spanning van binnen hem kunnen doen scheuren, en dientengevolge terstond doen vallen.

Men kan gemakkelijk de kracht berekenen, waarmede een luchtbol stijgt, als men zijne afmetingen en zijn gewigt kent. Omgekeerd kan men ook de vereischte grootte bepalen, als men weet hoe groot het gewigt is, dat moet worden opgeligt. Stellen wij, om dit met een voorbeeld op te helderen, dat de middellijn d van een ballon 12 el bedraagt, dan is zijn inhoud $\frac{1}{6} \pi d^3 = 905$ kub. ellen. Een kub. el lucht weegt 1.293 pond; het gewigt der verplaatste lucht bedraagt dus 1170 pond. Het lichtgas heeft doorgaans een soortelijk gewigt van 0.652 (1). Het in den luchtbol bevatte gas weegt dus 763 pond. Als nu de bol zelf, benevens de touwen en het schuitje, 175 pond weegt, zal het geheele gewigt 938 bedragen, terwijl de opwaartsche drukking 1170 pond is. De luchtbol wordt dus nog met eene kracht van 232 pond naar boven gedrukt, en twee personen zullen dus zich in het schuitje kunnen plaatsen.

Gay-Lussac en Biot waren de eersten (1804), die eene luchtreis onderna-

(1) Het soortelijk gewigt van zuiver ligt koolwaterstof is 0.5596. Het voor de verlichting gebruikte, dat niet scheikundig zuiver is, maar door zwaar koolwaterstof en andere gassen verontreinigd is, bedraagt gemiddeld 0.652

men, met het doel om waarnemingen omtrent den toestand van den dampkring op grooteren afstand van de aarde te doen. Bij hunne eerste luchtreis bereikten zij eene hoogte van 4000 ellen. Later steeg Gay-Lussac alleen op te Parijs, en bereikte eene hoogte van 7000 ellen. De kwikkolom in den barometer bedroeg slechts 33 duim, en de thermometer wees 10° onder nul, terwijl hij op aarde 30° aanwees. Na zes uren in de lucht te hebben doorgebragt, daalde Gay-Lussac weder op een afstand van 30 uren gaans van Parijs; zoodat de gemiddelde snelheid, waarmede hij zich in de hoogere luchtlagen bewogen had, 5 uren gaans in het uur bedragen had.

In 1850 hebben Barral en Bixio eveneens eene luchtreis ondernomen, met het doel om natuurkundige waarnemingen te doen. Zij bereikten ook eene hoogte van 7000 ellen, en namen eene temperatuur van 40° onder nul waar. Eene scheur in hun luchtbol noodzaakte hen echter weldra zich weder neêr te laten.

Tot nog toe heeft men van de luchtbollen geene nuttige toepassing kunnen maken, omdat het aan middelen ontbreekt om ze te rigten. Alle daartoe in het werk gestelde pogingen zijn vruchteloos geweest; alleen dan zoude zulks kunnen geschieden, wanneer men een bijzonder ligt werktuig uitvond, waardoor eene aanzienlijke beweegkracht kon voortgebragt worden. De eenige wijze waarop men thans den luchtbol van rigting kan doen veranderen, is, hem zoolang te doen rijzen of dalen, tot men in eene luchtlaag komt, waar de wind in de verlangde rigting waait.

B. BEWEGING VAN GASSEN.

109. **Uitstroomingssnelheid van gassen.** — Wanneer in den wand van een vat, waarin zich een gas bevindt, eene opening gemaakt wordt, en de spanning van het gas aanzienlijker is, dan de drukking der buitenlucht op de opening, dan zal het gas er uitstroomen. Door de uitstroomingssnelheid verstaat men den weg, dien een gas-molecule gedurende eene seconde zoude doorloopen, indien het gedurende die seconde dezelfde beweging behield, die het heeft bij het verlaten van de opening. De wetten, waardoor deze snelheid bepaald wordt, zijn dezelfde als die bij de uitstrooming van vloeistoffen; zij worden dus ook uitgedrukt door de formule $v = \sqrt{2gh}$, waarin h de gaskolom voorstelt, welke oorzaak is van de uitstrooming, even als bij de vloeistoffen door de hoogte der vochtkolom de snelheid bepaald wordt. Gassen, die in eene bepaalde ruimte zijn opgesloten, stroomen echter niet uit tengevolge van de drukking eener gaskolom, maar door de spanning van het gas in het vat. Deze spanning, of eigenlijk het verschil der spanningen binnen

en buiten het vat, die doorgaans door middel van de hoogte eener kwikkolom wordt aangewezen, moet dus eerst nog herleid worden tot eene gaskolom, die gelijke drukking zoude uitoefenen. Duidt h de hoogte der kwikkolom aan, dan zal $13.596h$ de hoogte zijn van eene waterkolom, die gelijke drukking veroorzaakt; om deze tot eene luchtkolom te herleiden, moet men hare hoogte deelen door het soortelijk gewigt van lucht 0.0012936, waardoor men krijgt $10510h$. Is het gas geen dampkringslucht, maar een ander gas, welks soortelijk gewigt (dat van lucht = 1 stellende) d is, dan had men door $0.0012936\ d$ moeten deelen; de hoogte der gaskolom zoude dus $\frac{10510\ h}{d}$ bedragen, en de formule voor de uitstroomingssnelheid wordt dan in ellen $v = \sqrt{\frac{2g.\ 10510\ h}{d}} = 454 \sqrt{\frac{h}{d}}$, waarin h de hoogte is eener kwikkolom, welke het verschil aanduidt tusschen de spanning binnen het vat en de drukking van buiten. Deze formule doet ons dus zien, dat bij de uitstrooming van gassen de digtheid niet buiten rekening mag gelaten worden, daar de snelheden omgekeerd evenredig zijn aan de vierkantwortels der digtheden.

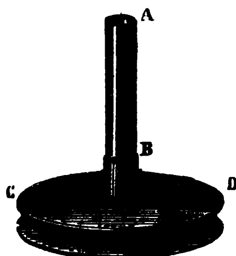
Is a de grootte der opening, in vierkanté meters uitgedrukt, dan bedraagt dus de hoeveelheid gas, die in eene seconde uitstroomt, $454\ a \sqrt{\frac{h}{d}}$ kub. ellen Stroomt bijv. lucht in eene luchtledige ruimte door eene opening van een vierkanten duim, dan is $h = 0.76$ en $d = 1$; men vindt dan voor de uitstroomingssnelheid 396 ellen, en voor de hoeveelheid bijna 40 kannen in de seconde.

Talrijke proeven zijn in het werk gesteld om de hier vermelde wet aan te toonen. De uitkomsten kwamen met de theorie overeen, doch toonden, dat er evenals bij de uitstrooming van vloeistoffen eene zamentrekking van den straal plaats heeft. Volgens de proeven van d'Aubuisson (1827), moet de snelheid vermenigvuldigd worden met 0.65, 0.93 of 0.95, naar gelang de uitstrooming plaats heeft door eene opening in eenen dunnen wand, door eene cilindrische tuit, of door eene kegelvormige.

Is aan de opening eene lange buis verbonden, dan ondergaat de snelheid eene aanzienlijke vermindering door de wrijving tegen de wanden. Uit de proeven van d'Aubuisson is gebleken, dat die tegenstand evenredig is aan de tweede magt der snelheid en aan de lengte der buis, doch omgekeerd evenredig aan de middellijn. Men moet echter hier, zoowel als bij de toepassing van de andere wetten voor beweging der gassen, niet uit het oog verliezen, dat de temperatuur eenen grooten invloed uitoefent op hunne spanning en op hunne digtheid.

110. **Zijdelingsche drukking van uitstroomende gassen.** — De tegenstand, dien de beweging van een gas in eene cilindrische buis ondervindt, is het gevolg van de drukking, welke de wanden der buis ondervinden. Evenals bij de vloeistoffen (74), kan evenwel ook bij de beweging van gassen eene zuiging waargenomen worden. Het is door deze, dat zich sommige verschijnselen laten verklaren, die bij eene oppervlakkige beschouwing geheel strijdig schijnen met de vermelde wetten. Wanneer men zamengeperste lucht uit een vat stroomen laat, door eene niet al te kleine opening, dan zal de uitstrooming met zeer groote snelheid plaats hebben. Houdt men dan eene dunne metalen of houten schijf, wier middellijn ongeveer zesmaal grooter is dan die der opening, op eenigen afstand van die opening, dan wordt zij door de uitstroomende lucht weggedrukt; laat men ze echter tot op een afstand van weinige strepen naderen, dan blijft zij, nadat de eerste tegenstand overwonnen is, digt bij den wand van het vat als 't ware zwevende, zoodat zelfs eene vrij aanzienlijke kracht noodig is, om ze er af te rukken. Men kan deze proef in het klein doen, door aan het einde van eene glazen buis AB eene kartonnen schijf CD te bevestigen (Fig. 127), en daar onder op eenen geringen afstand op kleine knopjes eene tweede even groote schijf te plaatsen. Blaast men nu met kracht door de buis, dan wordt de onderste schijf opgeligt, en blijft op een geringen afstand van de bovenste zweven, totdat men ophoudt met blazen. De oorzaak van dit verschijnsel is daarin gelegen, dat de lucht, die uit de opening B komt, zich tusschen de beide schijven tot eene dunne laag moet uitbreiden, en dus geringere digtheid verkrijgt, naarmate zij digter bij den rand komt. Is deze digtheid en dus ook de drukking geringer dan die der dampkringslucht, dan wordt door deze laatste de onderste schijf opgeligt en tot digt aan de opening gedrukt.

Fig. 127.



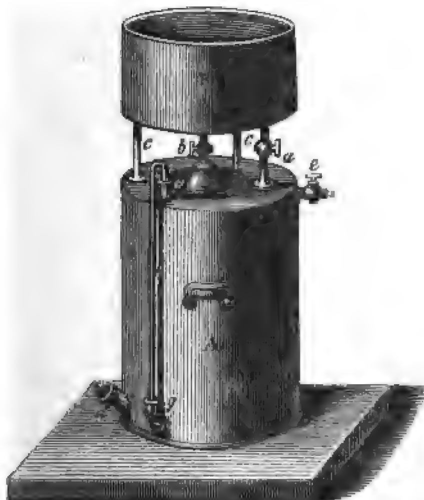
Faraday geeft eene nog eenvoudiger wijze aan, om deze proef te doen. Men houdt de hand horizontaal uitgestrekt, en de vingers aaneengesloten, zoodat tusschen deze zich slechts eene naauwe spleet bevindt. Houdt men nu den mond tegen de naauwe opening tusschen den middelsten en den wijsvinger, en blaast met kracht daardoor, dan zal een stuk papier, dat men onder de hand houdt, er tegenaan blijven hangen, zoo lang men blaast, doch er afvallen, zoodra men met blazen ophoudt.

111. **Reactie van uitstroomende gassen.** — Wij hebben ge-

zien (76), dat uitstroomende vloeistoffen aan het vat eene beweging kunnen geven in eene tegenovergestelde rigting; bij gassen heeft hetzelfde plaats. Men behoeft in den toestel in fig. 83 afgebeeld, van boven slechts lucht te blazen; terstond zal hij in beweging geraken. De stoot bij vuurwapenen is ook slechts het gevolg van de reactie van de met geweld uitstroomende gassen, welke bij de ontbranding van het buskruid gevormd worden.

112. **Gazometers.** — Toestellen, welke dienen om gas te bewaren en naar andere plaatsen, waar men het noodig heeft, door middel van buis-geleidingen heen te voeren, noemt men *gazometers.* Fig. 128 stelt er een voor, zoo als men ze voor natuurkundige proeven gebruikt. A is een blikken vat, dat van onderen met eene opening *d* voorzien is, die door eene kurk kan gesloten worden. Er bevinden zich kranen bij *e* en in de buizen *a* en *b*, die het vat A met het bovenste opene vat B verbinden. De buis *b*, die midden in het eenigzins gewelfde gedeelte van den deksel bevestigd is, steekt niet binnen in het vat uit, terwijl daarentegen de buis *a* zich bijna tot op den bodem van het vat A uitstrekt; *c c* zijn slechts stijltjes, waarop het bovenste vat rust; *g* is eene waterpeilbuis.

Fig. 128.

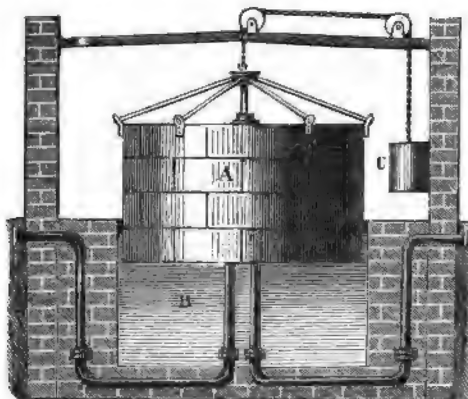


De cilinder A wordt, als men hem met gas vullen wil, eerst geheel met water gevuld; te dien einde sluit men de opening bij *d* en zet de drie kranen, *a*, *b* en *e*, open. Schenkt men nu boven in B water, dan loopt dit door *a* en *b* in den cilinder A, terwijl de lucht door *e* ontwijkt. Is de cilinder nagenoeg vol water, wat men aan de buis *g* bemerken kan, dan sluit men *e*; giet men dan nog water bij, dan zal dit door *a* in den cilinder stroomen, terwijl de laatste luchtdeelen door *b* ontwijken. Nu worden ook *a* en *b* gesloten, en in de opening *d*, van welke men de kurk heeft weggenomen, de buis gestoken, waardoor het gas aangevoerd wordt. Dit gas begeeft zich terstond boven in den cilinder A, en dringt

het water beneden bij *d* uit. De stand van het water in de buis *g* wijst steeds aan, hoe hoog het in het vat staat. Is dit nagenoeg vol gas, dan wordt *d* weder gesloten. Wil men nu het gas uit den gazometer naar een ander vat leiden, dan bevestigt men aan *e* eene gasleidingsbuis, bijv. van gevulcaniseerde elastieke gom, en opent *e* en *a*, na vooraf gezorgd te hebben, dat zich in den bak B eene aanzienlijke hoeveelheid water bevindt. Dit water komt door *a* tot onder in den cilinder en dringt het gas bij *e* uit.

De groote gazometers, welke het gas bevatten, dat voor de verlichting gebruikt wordt, zijn eenigzins anders ingerigt. Doorgaans bestaan zij, zoo als in fig. 129 is voorgesteld, uit eene klok van plaatijzer A, welke in een gemetselden bak met water B gedompeld is. Onder deze klok komen twee buizen uit, waarvan de eene het gas aanvoert, terwijl het door de andere ontwijken kan. Een tegenwigt C is over een paar katrollen met de klok verbonden. Stellen wij dat de middellijn der klok 10 el bedraagt, en dat zij 10,000 pond weegt, dan zal dit gewigt eene drukking op het gas en door middel van dit op het water uitoefenen, dat dientengevolge binnen in de klok lager zal staan dan er buiten. Dit verschil zal bijna 13 duim bedragen, daar eene drukking van 10,000 pond op eene cirkelvormige oppervlakte van 10 el middellijn overeenkomt met eene waterkolom van 12.7 duim. Deze duidt tevens de spanning aan van het gas in den gazometer boven de drukking der lucht. Het tegenwigt C dient om de drukking van de klok op het gas te kunnen matigen en regelmatiger maken.

Fig. 129.

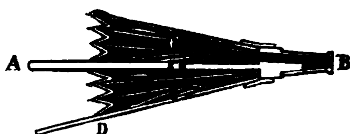


113. **Blaasbalg.** — Wil men een luchtstroom gebruiken om een vuur aan te blazen, dan maakt men gebruik van *blaasbalgen*. De gewone blaasbalg is genoeg bekend. De lucht stroomt door eene klep, die naar binnen opengaat, wanneer de inwendige ruimte van den blaasbalg vergroot wordt.

Drukt men ze nu weer te zamen, dan sluit zich de klep, en de lucht wordt door de pijp uitgeperst.

De gewone blaasbalg geeft geen aanhoudenden luchtstroom, daar deze telkens bij de vergrooting der inwendige ruimte ophoudt. Om in dit ongemak te voorzien, bedient men zich veel van den dubbelen blaasbalg (Fig. 130), waarvan de twee gedeelten door een middenschot zijn afgescheiden. Aan het bovenste gedeelte bevindt zich de uitstroomingspijp B, terwijl door eene klep C dit gedeelte met het onderste gemeenschap heeft. In BD is eveneens eene klep, die zich naar binnen opent. Wordt nu D opgeligt, dan wordt de lucht uit de onderste afdeeling in de bovenste gedrukt; door een gewigt, dat daar boven op geplaatst is, wordt zij hieruit weder door de pijp uitgeperst. Terwijl dit geschiedt, gaat D weder naar beneden, en vult zich het onderste gedeelte. Wordt D dan weder opgetrokken, dan komt een nieuwe luchtstroom in de bovenste ruimte. Men zal ligt inzien, dat op deze wijze onophoudelijk lucht uit de pijp bij B gedreven wordt.

Fig. 130.



C. MOLECULAIRE WERKINGEN TUSSCHEN GASSEN EN VASTE LIGCHAMEN OF VLOEISTOFFEN, EN TUSSCHEN GASSEN ONDERLING.

114. **Aantrekking tusschen vaste ligchamen en gassen.** — Brengt men een stukje houtskool, dat men eerst gegloeid en daarna om het uit te dooven onder kwikzilver gehouden heeft, in eene met gas gevulde ruimte, zooals in fig. 131 is voorgesteld, dan wordt dit gas door de kool opgenomen, zooals men aan het stijgen van het kwikzilver weldra merkt. Van ammoniakgas wordt het 90voud, van koolzuurgas het 20voud van het schijnbare volume van de kool opgenomen. Ook andere gassen, zelfs de dampkringslucht, worden door kool *geabsorbeerd*, doch in geringere mate; voor lucht is dit slechts het vijfvoudig volume. Dat lucht geabsorbeerd wordt, blijkt ook daaruit, dat kool, die aan de lucht blootgesteld is geweest, hare geschiktheid om andere gassen te absorberen verliest.

Fig. 131.



Dezelfde eigenschap wordt ook in hooge mate waargenomen bij de zoogenaamde platina-spons, welke uit zeer fijn verdeeld platina bestaat. Wordt een stroom waterstofgas

daarop geleid, dan is de absorptie zoo sterk, dat door de daarbij ontwikkelde warmte het gas ontvlamt. Op deze eigenschap berust de werking der zoogenaamde waterstof-vuurlamp van Döbereiner. Bij de beide vermelde stoffen wordt het absorptie-vermogen zeer vermeerderd, doordat zij zich in een fijn verdeelden toestand bevinden, en dus eene zeer groote oppervlakte hebben. Doch ook bij ligchamen, welke eene gladde oppervlakte hebben, heeft eene aankleving van gassen plaats. Dit is onder anderen het geval bij glas. Plaatst men een glas, waarin men water geschonken heeft, onder de klok van de luchtpomp, dan ziet men weldra aan de wanden luchtbellen te voorschijn komen. Hetzelfde kan men opmerken, als men het water in eene glazen kolf aan het koken brengt. Om dezelfde reden is het noodig het kwik in de barometerbuis te koken, daar men anders de lucht, die aan het glas kleeft, niet kan verwijderen. Uit deze en dergelijke verschijnselen mogen wij besluiten, dat alle vaste ligchamen door een dun laagje gas, dat waarschijnlijk aan hunne oppervlakte verdigt is, omgeven zijn.

Deze eigenschap geeft tevens eene verklaring van de zoogenaamde *wasembeelden*. Beweegt men een staafje over eene gepolijste metalen of glazen oppervlakte, en ademt vervolgens daartegen, dan komen de geschrevene figuren duidelijk te voorschijn. Men kan dit op de volgende wijze verklaren. Een ligchaam, dat goed gezuiverd en gepolijst is, kan den waterdamp, dien men uitademt, beter aan zijne oppervlakte verdigten, dan wanneer het eenigzins vuil is; dit is iedereen bij ondervinding bekend. Wordt eene glazen of metalen oppervlakte gepolijst, dan worden tevens de gassen, die er aan kleefden, weggenomen; wordt zij nu in aanraking gebragt met een ander minder zuiver ligchaam zooals het staafje, dan zal van de lucht of de gassen, die aan de oppervlakte van dat ligchaam aankleven, een gedeelte tot het zuivere overgaan. Van daar, dat op die plaatsen, waar de aanraking heeft plaats gevonden, door de daar aanklevende gassen eene veel geringere verdigting van dampen plaats heeft. Is omgekeerd de plaat onzuiver, doch de stift welke men er langs beweegt pas gezuiverd, dan zal men juist het omgegekeerde waarnemen, hoewel in minder sterken graad. De stift heeft dan van de aan de oppervlakte der plaat aanklevende lucht een gedeelte weggenomen. Zijn beide gezuiverd, dan neemt men geen beeld waar. Waidele heeft deze verschijnselen, waarop Moser (1842) het eerst de aandacht gevestigd heeft, nog duidelijker gemaakt, door eene zilveren plaat op gelijke wijze aan kwikzilverdampen bloot te stellen, als de glazen plaat aan waterdampen. De waargenomene verschijnselen waren volkomen dezelfde. Ademt men tegen eene gladde oppervlakte, waarop men een uitgeknipt papier gelegd heeft, en laat daarna de aangeslagen vochtdeelen weder verdampen;

neemt men dan het papier weg, en ademt op nieuw, dan ziet men ook het figuur van het papier te voorschijn komen. Dit schijnt daaraan te moeten worden toegeschreven, dat de na de eerste beademing verdampende vochtdeelen de aldaar aanklevende gassen medenemen, en dus de oppervlakte geschikter maken om op nieuw waterdamp te verdigten. Dit wordt nog daardoor bevestigd, dat de proef op eene pas gepolijste plaat minder goed gelukt, dan op eene plaat, die langeren tijd aan de lucht of aan een gas is blootgesteld geweest.

115. **Aantrekking tusschen vloeistoffen en gassen.** — Wanneer gassen en vloeistoffen met elkander in aanraking gebragt worden, dan wordt altijd meer of minder van het gas door het vocht opgenomen. De aard van het gas oefent hierop een grooten invloed uit; van ammoniakgas bijv. wordt door water het 700voudig volume opgenomen. Van deze sterke werking kan men zich overtuigen, wanneer men in de buis, in fig. 131 afgebeeld, in plaats van een stukje houtskool een weinig water brengt; het ammoniakgas wordt dan binnen weinige oogenblikken geheel geabsorbeerd. Hier heeft echter eene scheikundige werking plaats, hetwelk het geval niet is, wanneer water met zuurstof of met stikstof in aanraking wordt gebragt. Water houdt altijd lucht opgelost, en het is alleen door langdurig koken, dat het er van bevrijd kan worden. Onder de luchtpomp ziet men de luchtbellen ook uit het water ontwijken.

Volgens de laatste naauwkeurige proeven van Bunsen kan een volume water bij eene temperatuur van 0° en 76 duim drukking opnemen

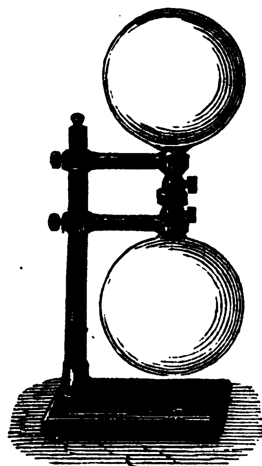
0.0183	volumen	lucht,
0.0150	„	stikstof,
0.0321	„	zuurstof,
0.8587	„	koolzuurgas.

Bij hoogere temperatuur is de hoeveelheid gas, die door water kan opgenomen worden, geringer.

116. **Diffusie van gassen.** — Wanneer men van twee glazen bollen (Fig. 132), beide met eene kraan voorzien, den eenen met koolzuurgas, den anderen met waterstofgas vult, en nadat zij met elkander in verbinding gebragt zijn, de kranen opent, dan zullen de gassen zich vermengen. Ook zelfs dan, wanneer de bol met waterstofgas boven dien met het zwaardere koolzuurgas geplaatst is, zal men na eenigen tijd in beide bollen een gelijk mengsel van beide gassen vinden. Deze beweging der gassen, die men gewoonlijk *diffusie* noemt, heeft niet alleen met de hier opgenoemde, maar zonder onderscheid

met alle luchtsoorten plaats. Bij gassen geldt dus niet de eigenschap, die wij bij vloeistoffen hebben aangetroffen, dat de zwaarste zich onder de ligtere plaatsen. De oorzaak hiervan schijnt in de spankracht der gassen gezocht te moeten worden, tengevolge van welke de moleculen van het eene tusschen die van het andere doordringen; elk gas op zich zelf beschouwd is dus in de geheele ruimte verspreid, zonder door de andere gestoord te worden. Bevinden zich dus verschillende gassen in eene beslotene ruimte, dan zal elk gas eene zekere spanning uitoefenen, die volgens de wet van Mariotte afhankelijk is van zijn volume. Het mengsel van die gassen zal dus eene spanning hebben, gelijk aan de som der spanningen, die elk gas zoude uitoefenen, als het alleen die ruimte vulde. Deze wet werd het eerst door Dalton (1800) ontdekt.

Fig. 132.



Tengevolge van deze eigenschap kan men dus den dampkring beschouwen als bestaande uit verschillende atmospheren, namelijk eene zuurstof-, eene stikstof-, eene koolzuur- en eene waterdamp-atmospheer, welke elk hare eigene spankracht hebben, terwijl de som van die spanningen datgene uitmaakt, wat wij de luchtdrukking noemen. De diffusie van gassen is ook oorzaak dat de verhouding tusschen de hoeveelheden zuurstof en stikstof overal in den dampkring dezelfde is.

HOOFDSTUK VI.

GELUID.

117. **Oorzaak van het geluid.** — Den indruk, dien de trillingen van de lucht of van vaste ligchamen op onzen gehoorzin maken, noemen wij *geluid*. Om de juistheid dezer bepaling te bewijzen, is het in de eerste plaats noodig aan te toonen, dat inderdaad overal, waar wij geluid waarnemen, trillingen plaats hebben.

Slaat men tegen eene metalen of glazen klok, zoodat zij geluid geeft, en laat men dan een klein metalen balletje tegen den wand aankomen, dan ziet men, dat dit met kracht er weder van afgestooten wordt Dit duurt voort, tot het geluid geheel heeft opgehouden. De beweging van het balletje wordt veroorzaakt door de trillende beweging van den wand der klok. Houdt men den vinger zacht er tegen, dan gevoelt men duidelijk de trillende beweging; drukt men wat sterker tegen het geluidgevend ligchaam, dan houdt de trillende beweging en ook het geluid terstond op.

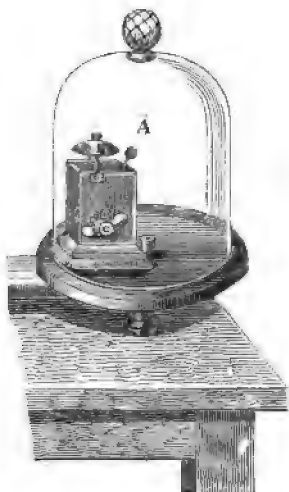
Neemt men in plaats van eene klok een ander vast ligchaam, bijv. eene metalen of glazen plaat, waarop men zand of iets dergelijks gestrooid heeft, dan ziet men, zoodra het ligchaam geluid geeft, de zandkorreltjes in beweging geraken. Plaatst men kleine stukjes papier op eene gespannen snaar, dan vliegen deze er af, zoodra men de snaar, door ze aan te strijken, geluid doet geven. Is de snaar niet al te kort of te sterk gespannen, dan kan men de trillende beweging ook duidelijk aan de snaar zelve waarnemen.

Wilde men deze proef herhalen met sommige blaasinstrumenten, dan zoude men evenwel bij het vaste ligchaam geene trilling bewerken. Inderdaad is het bij deze ook niet het vaste ligchaam, maar, zooals wij weldra zien zullen, de daarin bevatte lucht, wier trillingen oorzaak zijn van het geluid.

118 **Het geluid plant zich niet voort in het luchtledige** — De geluidstrillingen van de verschillende ligchamen zouden niet tot onzen gehoorzin kunnen geraken, zoo er niet eene stof was, die ze tot daar voortplantte. Deze stof is doorgaans de lucht. Dat deze noodig is tot voortplan-

ting van het geluid, kan door eene eenvoudige proef blijken. Wanneer men onder de klok van de luchtpomp (Fig. 133) een klokje A plaatst, waartegen gedurig een door een uurwerk in beweging gebragt hamertje slaat, dan zal men, zoolang er lucht onder de klok aanwezig is, het geluid duidelijk kunnen hooren. Naarmate echter de lucht er uit verwijderd wordt, wordt het geluid zwakker; eindelijk, als de ruimte onder de glazen klok nagenoeg luchtledig is, bemerkt men het geluid niet meer. Laat men er de lucht weder in, dan hoort men ook het klokje weder. Men moet hierbij evenwel de voorzorg nemen, van het klokje op een kussentje te plaatsen, daar anders het geluid door de vaste deelen van de luchtpomp genoegzaam zoude voortgeplant worden, om door ons gehoor vernomen te kunnen worden.

Fig. 133.



Met deze proef komt geheel overeen de waarneming, dat het geluid in hooge streken zachter schijnt te zijn. De slag van een vuurwapen is op een hoogen berg minder sterk dan in de laagte. Gay-Lussac bevond, dat, toen hij zich met zijn luchtbol op eene hoogte van 7000 ellen boven de oppervlakte der aarde bevond, zijne stem aanzienlijk verzwakt was.

Lucht is echter niet het eenige ligchaam, dat geschikt is om het geluid voort te planten. Wanneer men de klok van de luchtpomp met eene andere gassoort of damp vult, dan zal men het geluid van het daaronder geplaatste klokje weder duidelijk vernemen. Dat vloeistoffen ook goede geleiders van het geluid zijn, blijkt onder anderen daaruit, dat duikers onder water zeer duidelijk kunnen hooren, wat op het strand geschiedt. Ook vaste ligchamen bezitten deze eigenschap in hooge mate. Wij hebben ons hiervan reeds kunnen overtuigen bij de zoo even vermelde proef, toen wij opmerkzaam maakten op het noodzakelijke van de voorzorg om, door er een week ligchaam onder te plaatsen, de voortplanting van het geluid van het onder de klok der luchtpomp geplaatste klokje te beletten. Nog duidelijker blijkt zulks, wanneer men het oor houdt tegen het uiteinde van een langen houten balk, en aan het andere eind een zacht tikje laat geven; men verneemt het terstond en veel duidelijker, dan wanneer het geluid alleen door de lucht voortgeplant werd. De slag van een stuk geschut kan op verscheidene uren afstand vernomen wor-

den, als men het oor tegen den grond houdt. Eene stemvork, die men naauwelijks hoort, als men die, na ze in trilling gebragt te hebben, los in de hand houdt, geeft een sterk geluid, als men het benedenste uiteinde tegen de tanden of tegen een hard gedeelte van het hoofd drukt.

Niet alle vaste ligchamen zijn echter even geschikt om het geluid voort te planten. Men mag als regel stellen, dat zij het geluid des te beter zullen geleiden, naarmate zij meer veêrkrachtig zijn; daarom zijn dan ook weeke ligchamen, geweven stoffen en dergelijke zeer slechte geleiders, en worden zij daarentegen gebruikt om het geluid zoo veel mogelijk te beletten zich voort te planten.

119. **Trilling der lucht bij de voortplanting van het geluid.** — Wij hebben zoo even ons proefondervindelijk overtuigd, dat elk ligchaam, dat geluid voortbrengt, in trilling is. Wij zullen eveneens kunnen aantoonen, dat ook de lucht, die het geluid overbrengt, in trilling is. Te dien einde houde men een dun op een houten raampje gespannen papier, waarop men eenige zandkorreltjes gestrooid heeft, digt bij een geluidgevend ligchaam, zonder het echter er onmiddelijk mede in aanraking te brengen. Men zal zien, dat de zandkorreltjes in beweging geraken. Deze beweging ontvangen zij van het gespannen papier, dat op zijne beurt ze slechts van de omringende lucht verkrijgen kan.

Wij kunnen ons daardoor ook rekenschap geven van de wijze, waarop het geluid tot ons gehoororgaan komt. Het geluidgevend ligchaam brengt de lucht in trilling, en deze trillingen deelen zich mede aan een vlies, dat zich binnen in het oor bevindt en het *trommelvlies* genoemd wordt. Dit vlies geraakt daardoor ook in trilling, en het zijn deze trillingen, die tot de gehoorzenuw overgebragt, op onze hersens dien indruk teweeg brengen, dien wij geluid noemen.

120. **Hoedanigheden van het geluid.** — Het groote verschil tusschen onderscheiden geluiden zoude het moeijelijk maken eene bepaalde verdeeling aan te nemen, zoo men niet op drie zaken lette. Deze zijn: 1° de hoogte van het geluid, 2° de sterkte, en 3° de klank. Van de beide eerste zal het wel niet noodig zijn eene bepaling te geven; later zullen wij zien, waarvan zij afhankelijk zijn. Wat de laatste aangaat, zoo is het even moeijelijk daarvan eene juiste omschrijving te geven, als om de oorzaak aan te wijzen, waarvan het verschil in klank afhangt bij geluiden van dezelfde hoogte en gelijke sterkte, doch door verschillende muzijkinstrumenten voortgebragt. Zelfs bij gelijksoortige instrumenten kan de klank van het geluid

verschillend zijn; men kan bijv. gemakkelijk den klank van een waldhoorn onderscheiden van dien van eene trompet, ofschoon beide van koper vervaardigd zijn. Het verschil in klank bij het spraakorgaan van verschillende menschen is doorgaans aanzienlijk genoeg, om enkel aan het geluid der stem iemand te herkennen.

121. **Wijze van voortplanting van het geluid.** — Stellen wij ons voor, ten einde ons een denkbeeld te maken van de wijze waarop het geluid in een gas, zooals de lucht, voortgeplant wordt, dat het eene uiteinde Q (Fig. 134) van eene cilindrische buis PQ van onbepaalde lengte open is, terwijl aan het andere zich een zuiger A bevindt, die kan heen en weder geschoven worden. De op gelijken afstand van elkander getrokkene lijntjes stellen laagjes voor van de lucht, die overal in de buis gelijke digtheid bezit. Wordt nu de zuiger een eind in de buis geschoven tot in B (Fig. 135), dan zoude, indien de lucht niet veêrkrachtig was, op hetzelfde oogenblik een gedeelte der lucht bij Q naar buiten gedrukt worden; dit is echter niet het geval, daar de luchtdeeltjes, die zich het digtst bij den zuiger bevinden, zamengedrukt of verdigt zullen worden, doch door hunne veêrkracht zich weder uitzetten en die verdigting aan de volgende deeltjes mededeelen. De verdigting plant zich dus steeds verder voort, en wel in onze afbeelding van de linker- naar de regterhand. Terwijl dit geschiedt gaat echter de zuiger terug, tot hij weder in den oorspronkelijken stand A (Fig. 136) komt. Door deze beweging moet de lucht, die zich er achter bevond, eene uitzetting ondergaan, welke zich terugwaarts zal voortplanten tot den zuiger zelven. Indien deze teruggaande beweging van den zuiger dus onmiddelijk op de heengaande volgt, dan zullen de deeltjes, die zich het digtst er bij bevinden, reeds weder naar den linkerkant gaan, terwijl de daaropvolgende voortgaan in tegenovergestelde rigting. Achter de verdigting moet dus altijd eene

Fig. 134.

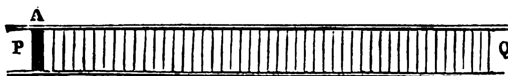


Fig. 135.

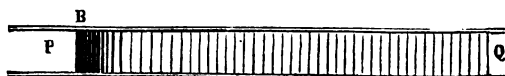
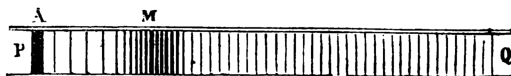
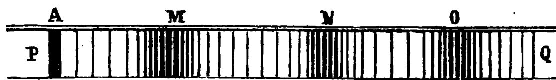


Fig. 136.



verdunning volgen, die evenals deze van P naar Q tot aan het einde van de buis voortgaat. Laat men de zuiger nogmaals heen en weêr gaan, dan zal er eene nieuwe verdigting en verdunning ontstaan, en zoo verder voor iedere heen- en weergaande beweging van den zuiger. Fig. 137 stelt den toestand voor, waarin zich de lucht in de buis na drie zulke schommelingen van den zuiger zal bevinden.

Fig. 137.



122. **Geluidgolven.** — Indien wij nu onderstellen, dat de zuiger in plaats van de langzame heen- en weergaande beweging, die wij hier, om de zaak aanschouwelijker te maken, ondersteld hebben, eene schielijke trillende beweging heeft, zooals wij hebben gezien, dat bij geluidgevende ligchamen plaats heeft, dan zal hetzelfde verschijnsel zich voordoen, doch in een veel korteren tijd. De verdigting en verdunning noemt men alsdan *geluidgolf*, terwijl de afstand tusschen twee punten M en N, in welke de lucht de grootste digtheid heeft bereikt, *golflengte* genoemd wordt. Hieruit volgt dus, dat juist in den tijd, in welken het geluidgevend ligchaam éëne trilling volbrengt, de beweging der lucht, of, wat hier hetzelfde is, het geluid éëne golflengte doorloopt. Er bestaat dus eene eenvoudige betrekking tusschen de golflengte, den weg, dien het geluid in een bepaalden tijd aflegt, en het aantal trillingen in dienzelfden tijd. Noemt men namelijk de snelheid van het geluid of den weg in eene seconde afgelegd v, het aantal trillingen in éëne seconde n, dan wordt de golflengte uitgedrukt door de formule $l = \frac{v}{n}$.

Wanneer er van snelheid en voortplanting van geluid sprake is, moet men zich van de beweging der luchtdeeltjes geene verkeerde voorstelling maken. Eene voortgaande beweging hebben zij niet, alleen eene heen- en weêrgaande of trillende, welke hun door het geluidgevend ligchaam wordt medegedeeld, en tot het trommelvlies wordt voortgeplant. Men kan zich hiervan het best een denkbeeld maken, als men in een stilstaand water, waarop het een of ander voorwerp drijft, een steentje vallen laat. Rondom dit ontstaan dan ook golven, die wel aan het drijvend ligchaam eene op- en neergaande beweging mededeelen, maar het niet zullen verwijderen van het punt, waar de golven ontstaan zijn.

Van het bijzonder geval, dat de lucht zich in eene cilindrische buis bevindt, waarin de voortplanting van de trillende beweging slechts in éëne

rigting kan plaats hebben, zal men nu zonder bezwaar kunnen overgaan tot het algemeene, wanneer de lucht namelijk niet is opgesloten, maar de voortplanting in alle rigtingen geschieden kan. Hetzelfde toch wat in het aangewezene geval in slechts eene rigting gebeurde, geschiedt dan in alle rigtingen, en wel op zoodanige gelijkvormige wijze, dat de verdigtingen en verdunningen zich op hetzelfde oogenblik op gelijken afstand van het middelpunt van de trillende beweging moeten bevinden. Hierdoor ontstaan dus zoogenaamde *spherische* of *bolvormige* golven. Het is klaarblijkelijk, dat de graad van verdigting en verdunning des te geringer zal worden, naarmate de golven zich verder van het middenpunt zullen verwijderen. In verband met het voorgaande blijkt hieruit, dat het geluid zich met gelijke snelheid en volkomen op dezelfde wijze in alle rigtingen moet voortplanten.

Wanneer op hetzelfde oogenblik verschillende ligchamen in eene trillende beweging zijn, dan zal elk van hen het middenpunt van eene spherische geluidgolf uitmaken. Die golven zullen dus elkander als 't ware ontmoeten, en een zelfde luchtdeeltje zal daardoor te gelijk meer dan ééne trillende beweging moeten aannemen. Dat dit inderdaad geschiedt, blijkt daaruit, dat men verscheidene geluiden te gelijker tijd vernemen kan. Ook bij de watergolven heeft hetzelfde plaats; laat men bijv. in een stilstaand water op meer dan eene plaats tegelijk steentjes vallen, dan veroorzaakt elk van deze golven, die elkander kruisen, maar toch nog elk afzonderlijk kunnen nagegaan en erkend worden.

123. **Snelheid van het geluid.** — Wij hebben reeds te kennen gegeven, wat men door snelheid van het geluid verstaat. Daar alle geluiden zich even schielijk voortplanten, is men geregtigd te spreken van de snelheid van het geluid in het algemeen, en niet van den eenen of anderen toon. Immers de opvolging van toonen, door een muzijkinstrument teweeg gebragt, blijft dezelfde, op welken afstand men zich ook plaatst. Was de snelheid van de hoogere toonen bijv. grooter, dan zouden deze eerder door ons vernomen worden, en de indruk zoude dus een geheel verschillende zijn.

De tijd, dien het geluid noodig heeft om van een afgelegen punt tot ons over te komen, is veel aanzienlijker dan die, welken het licht daartoe behoeft. Wordt bijv. op een afstand een vuurwapen afgeschoten, dan ziet men het licht, alvorens men den slag verneemt, althans wanneer de afstand niet al te gering is. Wij zullen later zien, dat de voortplanting van het licht ook niet oogenblikkelijk plaats heeft, doch dat zijne snelheid zoo aanzienlijk is, dat men den tijd, dien het noodig heeft om den weg van een aardsch voorwerp tot ons oog af te leggen, zonder onnaauwkeurigheid buiten reke-

ning nog laten. De proeven, die men genomen heeft, om de snelheid van het geluid in de lucht te bepalen, berusten dan ook geheel op deze onderstelling.

Reeds in de 17de eeuw hebben er onderzoekingen aangaande de snelheid van het geluid plaats gehad, maar deze misten een voldoenden graad van naauwkeurigheid. De eerste, die vertrouwen verdienen, geschiedden in 1738 bij Parijs door eenige leden der fransche *Académie des Sciences.* Twee waarnemers, geplaatst op twee punten, wier afstand meer dan 28000 ellen bedroeg, schoten beurtelings kanonnen af en namen den tijd waar, die verliep tusschen het zien van het licht en het hooren van het geluid. Dat men wederkeerig op beide plaatsen waarnam, geschiedde om den invloed van den wind te leeren kennen, van welken men had opgemerkt, dat hij, in de rigting van het geluid waaijende, de snelheid eenigzins doet toenemen. Uit hunne proeven leidden de waarnemers na de noodige herleidingen af, dat het geluid in eene seconde een weg van ruim 337 ellen aflegt. Daar men echter bij deze proeven geene rekenschap had gehouden van de temperatuur en van den toestand van de lucht, werden zij in 1822 door Arago, von Humboldt en anderen herhaald. Deze vonden, dat bij eene temperatuur van 0° de snelheid 331.05 bedraagt. Het volgende jaar werden dergelijke proeven door Moll en van Beek bij Utrecht genomen op twee punten, wier afstand 17669 ellen bedroeg. Uit hunne talrijke en met bijzondere zorgvuldigheid genomene proeven vonden zij eene snelheid van 332.05 ellen. Latere proeven, in 1825 door Parry in Noord-Amerika verrigt bij eene lage temperatuur, gaven tot 0° herleid 333 ellen. Deze waarnemingen komen dus vrij goed overeen, en men zal zeker digt bij de waarheid zijn, als men met de Nederlandsche waarnemers eene snelheid van 332 ellen aanneemt.

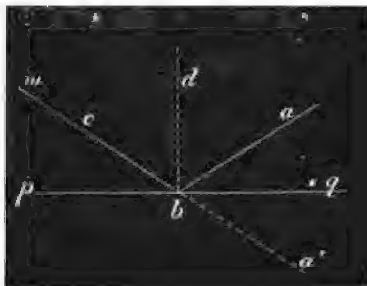
Wij hebben door het bijvoegen van den warmtegraad reeds te kennen gegeven, dat deze eenigen invloed op de snelheid van het geluid uitoefent. Dit laat zich gemakkelijk verklaren. Door de warmte zet zich de lucht uit; zijne digtheid wordt dus geringer, en het kan wiskundig bewezen worden, dat de snelheid van het geluid omgekeerd evenredig is aan den vierkantswortel uit de digtheid. Bij hoogere temperatuur is dus de snelheid van het geluid aanzienlijker; bij 20°C bijv. zal zij nagenoeg 344 ellen bedragen.

De invloed, dien de digtheid op de snelheid van het geluid in de lucht uitoefent, doet ons reeds gissen, dat die snelheid in andere gassen verschillend moet wezen. Dit is bevestigd door proefnemingen, omtrent welke wij hier niet in verdere bijzonderheden zullen treden, doch waaruit gebleken is, dat de snelheid van het geluid in koolzuurgas 116 ellen bedraagt, in zuurstofgas 317, in waterstofgas 1269 ellen.

In vloeistoffen plant het geluid zich veel schielijker voort, dan in de lucht. Uit de in 1827 door Colladon et Sturm in het werk gestelde proeven bleek de snelheid van het geluid in water ongeveer 1435 ellen in de seconde te bedragen. In vaste ligchamen is zij nog veel aanzienlijker. Hoewel de door Biot, Chladni en anderen gedane proefnemingen en berekeningen tot vrij uiteenloopende uitkomsten geleid hebben, mag men toch wel aannemen, dat de snelheid meer dan tienmaal grooter is dan die in de lucht.

124. **Terugkaatsing van het geluid.** — Wanneer eene geluidgolf van de lucht in eene andere middenstof overgaat, dan deelen zich de trillingen van de lucht aan deze mede; gedeeltelijk echter keert zij terug, en deze terugkaatsing zal volkomener zijn, als de wand, waartegen de golf aankomt, een vast ligchaam is. De wet, die hierbij geldt, is dezelfde, als die welke wij voor de terugkaatsing van veêrkrachtige ligchamen hebben leeren kennen, dat namelijk de hoek van terugkaatsing gelijk is aan den hoek van invalling. Stelt bijv. *ab* (Fig. 138) de rigting voor, volgens welke een geluidgolf tegen een wand *pq* aankomt, dan wordt hij volgens de rigting *bc* zoodanig teruggekaatst, dat de hoeken *abd* en *cbd* gelijk zijn. Bevindt men zich ergens in *cb*, dan zal men het geluid niet alleen hooren, alsof het regtstreeks van *a* kwam, maar men verneemt bovendien een tweede geluid, dat schijnt te komen van *a'*, welk punt evenver achter den wand *pq* is gelegen, als *a* er vóór ligt.

Fig. 138.



De aard van den wand oefent een grooten invloed uit op de sterkte van het teruggekaatste geluid. Aan de oppervlakte van het water is de terugkaatsing zeer sterk; evenzoo tegen muren en andere vaste ligchamen; zijn deze met wollen of linnen stoffen behangen, dan wordt het geluid veel minder sterk teruggekaatst.

De terugkaatsing van het geluid is oorzaak van het verschijnsel, dat algemeen onder den naam van *echo* bekend is, en dat daarin bestaat, dat men een geluid een of meermalen achtervolgens verneemt, zonder dat het meer dan eens wordt voortgebragt. Wanneer een waarnemer zich in *m* bevindt, dan zal hij een geluid, dat in *a* ontstaat, vernemen zoodra het den weg van *a* tot *m* heeft afgelegd; maar het geluid komt, zooals wij reeds opgemerkt hebben, ook langs

den weg *abcm* [illegible]aar deze weg langer is dan *am*, zal hij dit geluid eerst later vernemen, ten minste indien het verschil tusschen de wegen *am* en *abcm* groot genoeg is, om het regtstreeksche en het teruggekaatste geluid behoorlijk van elkander te kunnen onderscheiden. Bedraagt dit verschil 332 ellen, dan zal er juist eene seconde tusschen beiden verloopen. Het laatste geluid zal echter zwakker zijn, daar het een grooteren afstand doorloopen heeft.

Eenvoudiger wordt het geval, wanneer de waarnemer zelf het geluid voortbrengt; alsdan moet hij echter, om het teruggekaatste geluid te kunnen vernemen, zich plaatsen in eene lijn *bd*, welke loodregt op de terugkaatsende oppervlakte getrokken is. Het geluid zelf verneemt hij onmiddelijk; het teruggekaatste zooveel seconden later, als 332 ellen begrepen zijn in den dubbelen afstand van *d* tot *b*. Op een afstand van 166 ellen verneemt men den echo na verloop van eene seconde, op een afstand van 332 ellen eerst na twee seconden. Om de echo van een geluid, dat slechts van korten duur is, nog duidelijk te kunnen vernemen, moet men minstens op een afstand van 18 ellen geplaatst zijn. Daar de achtervolgende geluiden in dezelfde orde teruggekaatst worden, zal de echo ook meerdere woorden kunnen herhalen; om dit duidelijk te kunnen waarnemen, moet men evenwel zorg dragen, dat het laatste woord uitgesproken is, eer men de echo van het eerste heeft kunnen hooren.

Echo's kunnen door terugkaatsing van het geluid tegen verschillende voorwerpen worden teweeg gebragt; huizen, bergen, boomen, zelfs de wolken kunnen zulks doen. Het ratelend geluid van den donder ontstaat door gedurige terugkaatsing van eenen enkelen slag.

Bevindt men zich tusschen twee oppervlakten, die beide het geluid kunnen terugkaatsen, dan zal men meer dan eene echo kunnen vernemen. Men vindt echo's die 14 of 15 maal hetzelfde geluid herhalen; ten laatste is het echter door de verzwakking ter naauwernood hoorbaar.

Is het verschil der wegen, door het regtstreeksche en door het teruggekaatste geluid afgelegd, zeer gering, dan zal men de echo reeds vernemen, eer de indruk van het geluid zelf voorbij is. Dit heeft eene versterking van het oorspronkelijke geluid tengevolge, doch ook tevens eene mindere duidelijkheid. Dit verschijnsel is bekend onder den naam van *nagalm*. Het wordt dikwijls in kerken en andere groote gebouwen waargenomen, en maakt het moeijelijk den spreker te verstaan. In kleinere vertrekken heeft dit niet plaats; daar hier het oorspronkelijke en teruggekaatste geluid als 't ware te gelijk en daardoor versterkt vernomen worden, kan men in zoodanig vertrek beter iemand verstaan, dan in de vrije lucht. Evenals op de echo, zoo oefent ook op den nagalm de aard der wanden een grooten invloed uit. In

groote vertrekken, waar deze bijzonder hinderlijk is, tracht men er in te voorzien, door gordijnen en dergelijke voorwerpen tegen de muren te hangen.

Wanneer de oppervlakte, welke het geluid terugkaatst, zoodanigen vorm heeft, dat vele geluidgolven zich in een punt vereenigen, dan zal in dat punt eene versterking plaats hebben. Wanneer men twee parabolische spiegels in den in fig. 139 aangewezen stand opstelt, en in het brandpunt A van den eenen een geluidgevend voorwerp, bijv. een uurwerk, plaatst, dan zullen de geluidgolven van A uitgaande tegen de oppervlakte van den spiegel P teruggekaatst worden, en wel ten gevolge van eene eigenschap, die aan zoodanigen vorm van spiegels eigen is, volgens evenwijdige rigtingen. Worden zij nu door den spiegel Q opgevangen, dan verzamelen zij zich weder in het brandpunt B van dezen, alwaar dan eene versterking van het geluid moet plaats hebben. Om zich hiervan te overtuigen, behoeft men slechts het oor in B te plaatsen; men verneemt daar duidelijk het tikken van het uurwerk, zelfs al zijn de spiegels verscheidene ellen van elkaar verwijderd, terwijl men het in de tusschen A en B gelegene punten niet of althans minder sterk hoort. Iets dergelijks heeft plaats bij elliptische gewelven, zooals in fig. 140 is voorgesteld. In het eene brandpunt A hoort men door de terugkaatsing tegen de wanden duidelijk een geluid dat in B ontstaat, terwijl men het op eene andere plaats niet verneemt of ten minste veel zwakker.

Fig. 139.

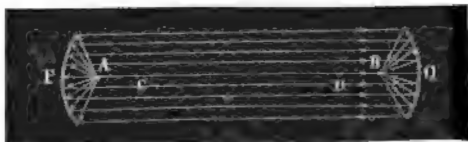
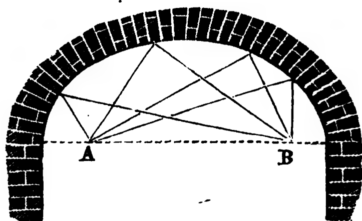


Fig. 140.



De werking van de algemeen bekende op schepen gebruikelijke roepbuis berust ook op de terugkaatsing van het geluid tegen den binnenwand. Eene sterke stem kan zich daardoor op een afstand van een uur gaans doen hooren. Bij de hoorbuis, waarvan hardhoorigen zich bedienen, is de werking omgekeerd. Door de kegelvormige opening worden meer geluidgolven opgevangen, en door terugkaatsing tegen de wanden versterkt voortgeplant tot aan het andere uiteinde, dat tegen het oor gehouden wordt.

125. Sterkte van het geluid. — Meermalen reeds hebben wij van de sterkte van het geluid gesproken; wij moeten nu echter bepaald nagaan, wat daarop invloed kan uitoefenen.

De sterkte van een toon hangt in de eerste plaats af van den uitslag of de amplitude der trillingen van het geluidgevend ligchaam. Bij klokken, snaren, enz. kan men het duidelijk bemerken, dat het geluid sterker is, naarmate de trillende beweging sterker is. Maar ook de grootte van het trillende ligchaam oefent hierop invloed uit. Eene groote klok geeft veel sterker geluid, dan een klein klokje, en dit wordt wederom veel duidelijker vernomen dan de toon, door de trilling eener staaf of snaar veroorzaakt. Veelal echter kan men het geluid versterken, door de trillende beweging mede te deelen aan andere ligchamen, die door hunne grootere oppervlakte eene grootere massa lucht in beweging brengen. Daarom zal een snaar op eene viool of bas gespannen een veel sterker geluid geven, dan wanneer zij niet met zoodanig instrument verbonden is.

Wij hebben reeds de opmerking gemaakt, dat het geluid zwakker wordt, naarmate de afstand grooter wordt. Het zal niet moeijelijk zijn ook daarvan de reden aan te toonen. Wanneer de voortplanting naar alle kanten geschiedt, vormen zich spherische geluidgolven; de beweging van elk luchtdeeltje gaat over tot de volgende, maar steeds zich van het middenpunt van den spherischen golf verwijderende. De verdigtingen en verdunningen, of korter gezegd, de trillingen worden dus medegedeeld, maar zij kunnen hare zelfde amplitude niet behouden. Want neemt men in aanmerking, dat op een tweemaal grooteren afstand van het middenpunt zich viermaal meer deeltjes bevinden (daar de oppervlakken van bollen zich verhouden als de vierkanten der stralen), dan zal de uitslag niet dezelfde kunnen blijven, maar moet ook viermaal geringer zijn. De amplitude der trillingen moet dus afnemen op grooteren afstand, en wel in de omgekeerde reden van de tweede magten dier afstanden. Proefondervindelijk heeft men zich hiervan overtuigd, door volkomen gelijke klokken alleen of gezamenlijk op verschillende afstanden geluid te doen geven.

Wanneer het geluid zich niet in alle rigtingen kan voortplanten, zal de verzwakking van het geluid minder aanzienlijk zijn. Kan de voortplanting slechts in ééne rigting geschieden, dan moet het geluid zijne sterkte behouden. Dit is bijv. het geval wanneer het zich in lange buizen voortplant; op eene geringe verzwakking na, veroorzaakt door mededeeling der trillingen aan de wanden, zal het onveranderd aan het uiteinde der buis gehoord worden. Men heeft hiervan eene nuttige toepassing gemaakt bij de spreekbuizen, waardoor twee menschen, op aanzienlijken afstand of in verschillende vertrekken geplaatst, zonder hunne stem te verheffen met elkander spreken kunnen.

Wij moeten hier nog opmerkzaam maken op het onderscheid tusschen geluid en geraas. Dezen laatsten naam geeft men aan geluiden, die zich zoodanig onderling vermengen, dat het niet meer mogelijk is elk afzonderlijk te onderscheiden. De indruk, die daardoor op ons gehoor gemaakt wordt, is doorgaans een onaangename.

126. **Hoogte der toonen.** — De hoogte van een toon hangt alleen af van de snelheid der trillingen, dat is van het aantal trillingen, die in eenen bepaalden tijd, bijv. in ééne seconde volbragt worden. Hoe grooter dat aantal is, des te hooger zal de toon wezen. Eene eenvoudige beschouwing van een geluidgevend ligchaam is echter voldoende om ons te overtuigen, dat eene onmiddelijke telling onmogelijk is, en dat men dus naar andere middelen heeft moeten omzien, om dit doel te kunnen bereiken. Wij zullen de eenvoudigste daarvan beschouwen.

127. **Sirène.** — Een der vernuftigste werktuigen om de geluidstrillingen te tellen is de zoogenaamde *Sirène* van Cagniard-Latour, welke in fig. 141 en 142 is afgebeeld. Deze, doorgaans twee tot driemaal grooter dan de hier

Fig. 141.

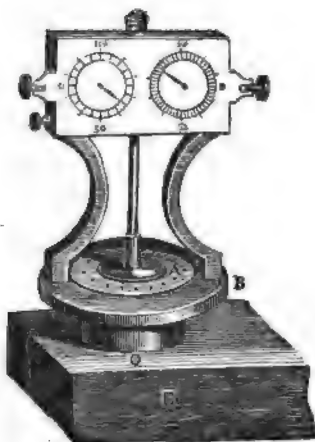
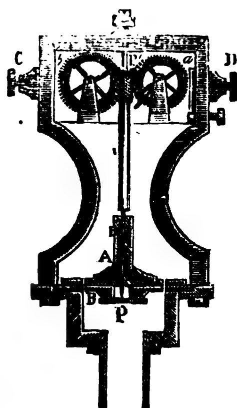


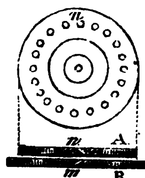
Fig. 142.



afgebeelde, is geheel van koper vervaardigd en bestaat uit eene cilindrische doos O, die door eene daaronder bevestigde buis verbonden wordt met een

blaasbalg E (zie later), waarmede men eenen standvastigen luchtstroom kan aanvoeren. Deze doos O is van boven met eene metalen plaat B gesloten, waarin zich ronde gaatjes bevinden, die echter niet loodregt op het vlak van die plaat uitgehold zijn, maar in eene schuine rigting, zooals in fig. 143 bij *m* in doorsnede is voorgesteld. Boven deze plaat bevindt zich eene andere A, die echter niet met de plaat B in aanraking is, doch rust op de fijne punt eener spil P; daar het andere uiteinde van deze, eveneens in eene fijne punt uitloopt, kan de geheele spil met de plaat A met eenen uiterst geringen tegenstand, door wrijving bij P en P′ veroorzaakt, draaijen. In deze plaat A bevinden zich ook schuinsche gaatjes, juist evenveel als in het deksel der doos O, maar zooals uit fig. 143 bij *n* in doorsnede te zien is, juist in tegengestelde rigting uitgehold. Komt er nu een luchtstroom door de benedenste gaatjes *m*, dan zal de rigting van dien luchtstroom niet vertikaal naar boven, maar schuins zijn, zoodat hij nagenoeg loodregt tegen de wanden der gaatjes *n* in de bovenste plaat aankomt, en deze plaat, die zeer bewegelijk is, aanstonds eene draaijende beweging doet aannemen. Daar de onderste plaat in rust blijft, zoo zal elke opening daarin zich beurtelings bevinden onder eene opening in de bovenste plaat, en onder het gedeelte tusschen twee achtervolgende openingen. De luchtstroom wordt dus beurtelings doorgelaten en afgebroken, en daar dit zeer regelmatig geschiedt, zal ook de lucht daardoor in eene regelmatige trilling geraken, en er ontstaat een toon. Zijn er bijv. in elke plaat 25 gaatjes, dan zal gedurende eene omdraaijing der plaat de lucht 25maal doorgelaten en 25maal tegengehouden zijn; er hebben dan 25 trillingen plaats gehad. Boven aan de spil P P′ is een zoogenaamde schroef zonder eind, welke in de tanden der getande raderen *a* en *b* ingrijpt en deze doet draaijen. Daar op de assen dezer raderen wijzers bevestigd zijn, zal men op de wijzerplaten gemakkelijk kunnen nagaan, hoeveel omwentelingen de spil gemaakt heeft.

Fig. 143.



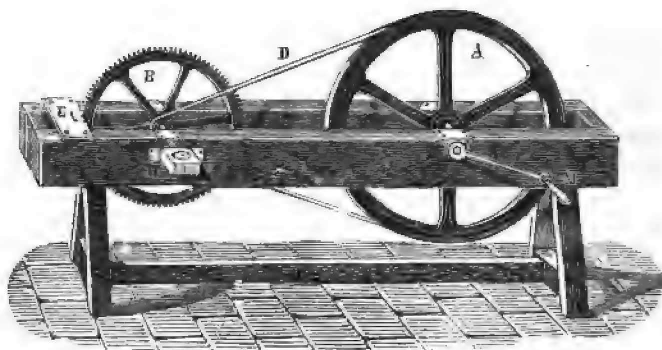
Wil men zich van dit werktuig bedienen om het aantal trillingen van een bepaalden toon te tellen, dan moet men er een luchtstroom in leiden en dien zoodanige sterkte geven, dat de sirène den verlangden toon gedurende eenige seconden blijft aangeven. Men behoeft dan slechts den tijd waar te nemen, alsmede het aantal omwentelingen van de as P P′, door de wijzers aangewezen, om het aantal trillingen in ééne seconde daaruit af te kunnen leiden.

Het gebruik van dit vernuftig uitgedachte werktuig is echter niet van zwarigheid ontbloot. Vooreerst is het zeer moeijelijk om den toon eenige oogenblikken op dezelfde hoogte te houden; voorts zijn de lage toonen minder duidelijk en de hooge uiterst schel, zoodat een zeer geoefend oor

noodig is om na te gaan, of de toon juist de verlangde hoogte heeft en behoudt.

128. **Getande rad van Savart.** — Een ander middel om het aantal trillingen te bepalen, is het in fig. 144 afgebeelde getande rad van Savart.

Fig. 144.



De beweging van het rad A wordt door middel van een riem zonder eind D overgebragt op de spil van het getande rad B, dat daardoor in eene zeer snelle omdraaijende beweging geraakt. Het aantal omdraaijingen wordt op eene dergelijke wijze als bij de Sirène, door een wijzer bij H aangewezen. De tanden van het rad komen achtervolgens tegen een kaartje E, dat daardoor in trilling geraakt en een toon doet hooren. Door middel van de kruk M kan men de beweging schielijker of langzamer maken, totdat men den verlangden toon verkrijgt, en dan, daar men het aantal tanden op den omtrek van het rad B kent, ook het aantal trillingen in een zekeren tijd bepalen. De ondervinding leert evenwel, dat het ook bij dit werktuig moeijelijk is, den toon genoegzaam op dezelfde hoogte te houden.

129. **Uitkomsten der proeven over het aantal trillingen der toonen.** — Door middel van deze werktuigen en ook nog door andere onderzoekingen, welke wij hier, zonder al te wijdloopig te worden, niet kunnen vermelden, is men tot het resultaat gekomen, zooals wij gedeeltelijk reeds hiervoren vermeld hebben, dat bij hoogere toonen het aantal trillingen grooter is dan bij lagere, en dat even hooge toonen door een gelijk aantal trillingen worden voortgebragt, onverschillig op welke wijze die trillingen ontstaan.

Niet alle toonen zijn echter even merkbaar voor het gehoor. De oorzaak daarvan schijnt niet alleen in de meerdere of mindere sterkte gezocht te moeten worden, maar ook in het òf te groote òf te geringe aantal trillingen, welke het geluidgevend ligchaam in een bepaalden tijd volbrengt. Uit verschillende waarnemingen, eerst door Savart en later door Despretz in het werk gesteld, is het gebleken, dat het menschelijk gehoor niet geschikt is om toonen te vernemen, welke minder dan 32 trillingen in de seconde volbrengen, noch die waartoe meer dan 73.700 trillingen in de seconde noodig zijn. Men mag hierbij evenwel niet uit het oog verliezen, dat bij zulke hooge toonen wegens de ontzettende snelheid der trillingen de amphitude en daardoor ook de sterkte der toonen slechts zeer gering kan zijn. Het is dus wel mogelijk, dat men nog hoogere toonen zoude kunnen waarnemen, indien men middelen had om ze genoegzaam te versterken.

130. **Onderlinge betrekking tusschen het aantal trillingen van verschillende toonen.** — De meeste menschen kunnen niet alleen onderscheiden, welke van twee toonen de hoogste is, maar ook welke betrekking er tusschen die toonen bestaat, zoodat een gelijk verschil in hoogte op hun gehoororgaan steeds denzelfden indruk maakt. De geschiktheid om dit op te merken, welke men doorgaans *muzikaal gehoor* noemt, bestaat dus eigenlijk in eene vaardigheid om het aantal trillingen van eenen bepaalden toon te tellen, of beter gezegd, om den indruk, door een bepaald aantal trillingen op het gehoororgaan gemaakt, te herkennen, al is dan ook het getal dier trillingen onbekend.

Indien dit zoo is, dan mogen wij hieruit het gevolg trekken, dat de betrekking tusschen die toonen, wier trillingen in eene zeer eenvoudige verhouding tot elkander staan, het gemakkelijkst waargenomen wordt. Dit zal dan in de eerste plaats het geval moeten zijn met die toonen, wier trillingen zich verhouden als de getallen 1, 2, 3, 4, 5, enz. Inderdaad heeft de ondervinding zulks aangetoond. Duidt men bijv. zekeren grondtoon, dat is het aantal van zijne trillingen, aan door 1, dan noemt men den toon, welke door een dubbel aantal trillingen wordt voorgebragt, en dus door het getal 2 kan worden voorgesteld, de *octaaf*. De betrekking tusschen die toonen is zoo eenvoudig, dat ieder, die niet geheel van muzikaal gehoor beroofd is, ze terstond opmerkt en onthoudt. Na deze komt het eerst in aanmerking de toon, wier trillingen zich tot die van den grondtoon verhouden als 3 : 2, en dus wordt voorgesteld door de breuk $\frac{3}{2}$; dezen toon noemt men de *quint* van den grondtoon. De verhouding 4 : 3 wordt *quart* genoemd, 5 : 4 heet *groote terts*, 6 : 5 *kleine terts*. De onderlinge verhouding dezer toonen wordt gevonden door deze

breuken in elkander te deelen. Zoo is bijv. de betrekking tusschen de groote en kleine terts $\frac{5}{4} : \frac{6}{5} = \frac{25}{24}$, die tusschen de quart en groote terts $\frac{4}{3} : \frac{5}{4} = \frac{16}{15}$, tusschen de quint en de groote terts $\frac{3}{2} : \frac{5}{4} = \frac{6}{5}$. Uit deze laatste blijkt, dat de verhouding tusschen den grondtoon en de kleine terts dezelfde is, als tusschen de groote terts en de quint. Al deze verhoudingen worden aangeduid door het woord *interval*, dat eigenlijk tusschenruimte beteekent.

Niet alleen wordt de verhouding tusschen die toonen, welke door eenvoudige getallen worden voorgesteld, gemakkelijk waargenomen, maar wanneer men ze tegelijk verneemt is de indruk ook des te aangenamer, naarmate die verhouding eenvoudiger is. Zoodanige toonen noemt men doorgaans *consonerende* toonen. In de eerste plaats is dit het geval met die, welke worden voorgesteld door de getallen 1, $\frac{5}{4}$, $\frac{3}{2}$ en 2, dat is, den grondtoon, de groote terts, de quint en de octaaf. Aan deze vereeniging van toonen heeft men den naam van *volmaakt* of *groot akkoord* gegeven. Wil men het getal trillingen dezer toonen door de kleinst mogelijke geheele getallen voorstellen, dan vindt men 4, 5, 6 en 8.

Kan de verhouding tusschen twee toonen niet dan door groote getallen aangeduid worden, zooals bijv. $\frac{81}{80}$, dan maken zij, als zij te zamen gehoord worden, een onaangenamen indruk; zoodanige noemt men *dissonerende* toonen of *dissonanten*.

131. **Toonladder.** — Behalve deze toonen zijn er daartusschen nog anderen, die zelfs in de eenvoudigste muzijk gedurig gebruikt worden. Men vindt die, door de quart en de quint als grondtoonen van een nieuw volmaakt akkoord te nemen. Voor het volmaakt akkoord van de quart vindt men aldus $\frac{4}{3} \times \frac{5}{4} = \frac{5}{3}$, welke de groote terts van de quart is, en $\frac{4}{3} \times \frac{3}{2} = 2$, welke de quint van de quart is, terwijl het cijfer 2 aanduidt, dat deze laatste niets anders dan de octaaf van den grondtoon is. Neemt men het volmaakt akkoord van de quint, dan vindt men eerst $\frac{3}{2} \times \frac{5}{4} = \frac{15}{8}$, en vervolgens $\frac{3}{2} \times \frac{3}{2} = \frac{9}{4}$; daar deze laatste toon echter buiten de getallen 1 en 2 komt, zoo neemt men zijne lagere octaaf, die door $\frac{9}{8}$ wordt voorgesteld. Wij hebben aldus eene reeks van toonen verkregen, die worden voorgesteld door de volgende breuken:

1,	$\frac{9}{8}$,	$\frac{5}{4}$,	$\frac{4}{3}$,	$\frac{3}{2}$,	$\frac{5}{3}$,	$\frac{15}{8}$,	2.
ut,	*ré*,	*mi*,	*fa*,	*sol*,	*la*,	*si*,	*ut*.
C,	D,	E,	F,	G,	A,	B,	C.

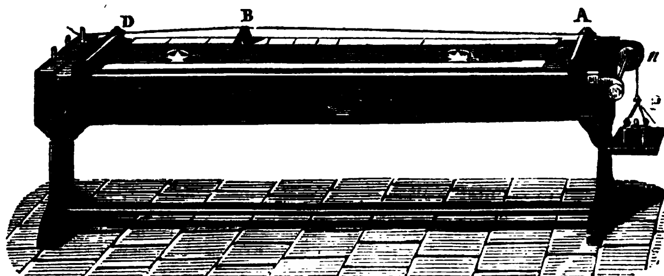
De daaronder geplaatste lettergrepen duiden de namen aan, welke de Franschen en Italianen aan de toonen gegeven hebben; bij ons en bij de Duitschers

zijn daarentegen de in den derden regel geplaatste letters in gebruik. Het aantal trillingen, die deze toonen in eenen zelfden tijd volbrengen, wordt het eenvoudigst voorgesteld door de geheele getallen 24, 27, 30, 32, 36, 40, 45 en 48.

Het interval tusschen twee achtervolgende toonen is blijkbaar niet altijd hetzelfde. Tusschen C en D, F en G, A en B is het $\frac{9}{8}$, tusschen D en E, G en A is het $\frac{10}{9}$, terwijl het tusschen E en F, alsmede tusschen B en C slechts $\frac{16}{15}$ bedraagt. De intervallen $\frac{10}{9}$ en $\frac{9}{8}$ noemt men heele toonen, en wel het eerste groote heele toon, het laatste kleine heele toon; $\frac{16}{15}$ daarentegen heet een halve toon. Men heeft dus in de toonladder eerst twee heele toonen, daarna een halven toon, vervolgens drie heele en eindelijk een halven toon. Hoewel de beide intervallen $\frac{9}{8}$ en $\frac{10}{9}$ niet gelijk zijn, zoo verschilt toch hunne onderlinge verhouding $\frac{80}{81}$ zoo weinig van de eenheid, dat een buitengewoon scherp muzikaal gehoor noodig is, om het verschil van $\frac{1}{81}$ te onderscheiden. In de toonkunst noemt men zoodanig klein onderscheid een komma.

132. **Sonometer.** — Men kan zich van de juistheid dezer getallen op eene eenvoudige wijze overtuigen door den in fig. 145 afgebeelden toestel, welke bestaat

Fig. 145.



uit eene holle houten kist, waarover eene snaar gespannen is, wier eene uiteinde bij D is vastgemaakt, terwijl zij door gewigten P, aan het andere uiteinde A over een katrolletje *n* trekkende, gespannen wordt. Eene der voornaamste eigenschappen der trillingen van snaren is, zoo als wij weldra zien zullen, dat bij eene zelfde en gelijk gespannen snaar het aantal trillingen omgekeerd evenredig is aan de lengte. Geeft men nu, door het blokje B te verplaatsen, aan de snaar achtervolgens eene lengte, voorgesteld door de breuken $\frac{8}{9}$, $\frac{4}{5}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{8}{15}$ en $\frac{1}{2}$, welke de omgekeerde zijn van de getallen, die de toonladder voorstellen, dan zal men gemakkelijk de toonen van de toonladder erkennen.

14

133. **Kruizen en mollen.** — Wij hebben de toonladder zoo even begonnen met den toon C; men zal evenwel ook met een anderen kunnen aanvangen. In dat geval is het echter noodig, in sommige der volgende toonen eenige wijziging te brengen, daar in eene volmaakte toonladder alle intervallen heele toonen moeten zijn, behalve tusschen den 3en en 4en en tusschen den 7en en 8en toon. Begint men bijv. met G, dan zal men halve toonen hebben tusschen den 3en en 4en toon, alsmede tusschen den 6en en 7en. Om deze tot eene goede toonladder te maken moet men dus den 7en toon hooger maken, zoodat het interval tusschen den 6en en 7en een heele toon, doch dat tusschen den 7en en 8en een halve toon wordt. Den nieuwen toon noemt men dan een *kruis*. In het hier gekozene voorbeeld zal het dus *F kruis* zijn, of zooals men het veelal noemt *Fis*; eenvoudigheidshalve wordt deze F ♯ geschreven. Begint men met A, dan moet men C ♯, F , G ♯ nemen in plaats van C, F en G, omdat zonder kruizen de halve toonen tusschen den 2en en 3en en tusschen den 5en en 6en toon zouden zijn.

Wil men de toonladder met F doen aanvangen, dan zoude men de halve toonen tusschen den 4en en 5en en tusschen den 7en en 8en toon hebben; het is dus noodig in plaats van den 4en toon B een lageren te nemen; dezen noemt men dan *B mol* of *Bes* (B ♭). Men kan ook met een zoodanigen toon de toonladder beginnen. Bijv. met *A* ♭ of *As* aanvangende moet men, om de gewone intervallen te verkrijgen, B door B ♭, D door D ♭ en E door E ♭ vervangen.

De verhouding tusschen een toon en zijn kruis wordt aangeduid door $\frac{25}{24}$, tusschen een toon en zijn mol door $\frac{24}{25}$. Zoo zal dus bijv. F ♯ worden uitgedrukt door $\frac{4}{3} \times \frac{25}{24} = \frac{25}{18}$; B ♭ door $\frac{15}{8} \times \frac{24}{25} = \frac{9}{5}$. Men moet evenwel hierbij niet uit het oog verliezen, dat een kruis van een toon en de mol van den eerstvolgenden toon niet volkomen gelijk zijn. Zoo zal bijv. G ♯ worden voorgesteld door $\frac{3}{2} \times \frac{25}{24} = \frac{25}{16}$, en A ♭ door $\frac{5}{3} \times \frac{24}{25} = \frac{8}{5}$, tusschen welke toonen een verschil van $\frac{3}{80}$ bestaat, dat evenwel niet zeer merkbaar zijn zal, en het dan ook niet hinderlijk voor het gehoor maakt, indien men bij sommige muzijkinstrumenten, zoo als de piano, voor beide denzelfden toon neemt. Bij die snaarinstrumenten, waar men zelf den toon maakt, door de snaar op eene bepaalde plaats te drukken, zoo als bij de viool en de violoncel het geval is, kan men echter de toonladder volkomen zuiver maken, onverschillig met welken toon men begint.

In de zoogenaamde *chromatische* toonladder, waar het interval tusschen twee achtervolgende toonen altijd slechts één halve toon is, en die dus uit 13 in plaats van uit 8 toonen bestaat, wordt hierin geen onderscheid gemaakt, daar hier noodzakelijk C ♯ en D ♭, D ♯ en E ♭, enz., door denzelfden toon moeten worden uitgedrukt, en evenzoo de verdere tusschen de toonen van de gewone toonladder ingevoegde.

Behalve van de bovengemelde gewone toonladder maakt men ook nog van eene andere gebruik, niet berustende op het volmaakt akkoord, dat met de groote terts begint, maar op het zoogenaamd mineur of klein akkoord, dat met de kleine terts aanvangt. Dit akkoord wordt dus uitgedrukt door de getallen 1, $\frac{6}{5}$, $\frac{3}{2}$, 2. Voegt men daar nu, even als hierboven (131), de toonen bij, die men verkrijgt door de quart en quint als grondtoonen van een mineur-akkoord te nemen, dan vindt men $\frac{4}{3} \times \frac{6}{5} = \frac{8}{5}$, $\frac{4}{3} \times \frac{3}{2} = 2$, $\frac{3}{2} \times \frac{6}{5} = \frac{9}{5}$, $\frac{3}{2} \times \frac{3}{2} = \frac{9}{4}$: deze laatste weder door de lagere octaaf $\frac{9}{8}$ vervangende, zal men dus hebben 1, $\frac{9}{8}$, $\frac{6}{5}$, $\frac{4}{3}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{8}{5}$, $\frac{9}{5}$, 2, welke de mineur-toonladder uitmaakt. Doo de intervallen tusschen elke twee achtervolgende toonen te berekenen, zal men zich kunnen overtuigen, dat hier halve toonen zijn tusschen den 2en en 3en, alsmede tusschen den 5en en 6en toon. Begint men dus de gewone toonladder met A in plaats van met C, dan heeft men de mineur-toonladder.

134. **Temperatuur.** — De ongelijkheid der intervallen en wel bepaaldelijk van de groote en kleine heele toonen, waarvan de eerste door $\frac{10}{9}$, de andere door $\frac{9}{8}$ worden voorgesteld, is oorzaak, dat wanneer een muzijk-instrument volkomen gestemd is voor de toonladder, die met C begint, het niet juist gestemd zal wezen, als men de toonladder met eenen anderen toon begint. Te meer nog zal zulks het geval zijn, daar, zoo als reeds opgemerkt is, het kruis van een toon en de mol van den volgenden toon niet gelijk zijn. Door op de verschillende toonladders de berekening toe te passen, zal men zich hiervan gemakkelijk kunnen overtuigen. Om evenwel te voorkomen, dat daardoor minder aangename akkoorden ontstaan bij instrumenten met vaste toonen, zooals de piano, geeft men aan iederen toon bij het stemmen eene gemiddelde hoogte, zoodat hij wel dan eens te hoog, dan weêr te laag is; maar dit verschil is zoo gering, dat men het niet verneemt. Dit noemt men den toon *temperen*. Is dit zoodanig geschied, dat alle halve toonen even groot genomen zijn, dan noemt men deze wijze van temperen de *gelijkzwevende temperatuur*. Daar er tusschen den grondtoon en de octaaf twaalf intervallen van een halven toon zijn, zoo zal elk worden uitgedrukt door $\sqrt[12]{2} = 1{,}059$. Berekent men nu de getallen, waardoor elk der toonen wordt voorgesteld, dan zal men bevinden, dat het verschil van deze met die van de gewone toonladder slechts zeer gering is.

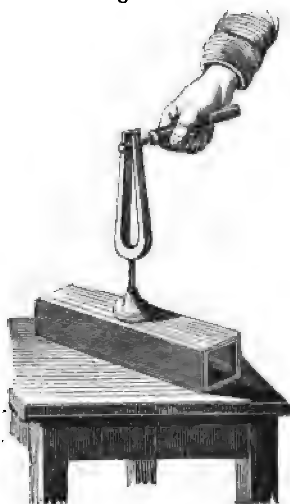
135. **Aantal trillingen van een bepaalden toon.** — Uit het bovenstaande blijkt, dat men als grondtoon C den toon kan aannemen, dien men wil, mits men slechts de andere toonen daarnaar regelt. Om echter daaromtrent overeenkomst te hebben, heeft men in de theorie als C een

toon aangenomen, die 32 trillingen in de seconde volbrengt; de hoogere magten van 2 stellen dus allen hoogere octaven van die C voor. De lage C van een violoncel is een toon, waartoe 128 trillingen in de seconde noodig zijn. Voor de lage C van de viool zijn 512 trillingen noodig. De A van de viool, welke door de derde snaar wordt aangegeven, bedraagt dan 853 trillingen in de seconde. Veelal echter wordt deze in de praktijk hooger gesteld; bij de duitsche toonkunstenaars wordt zelfs eene A van 880 trillingen in de seconde aangenomen.

Brengt men deze opgaven in verband met de vroeger (122) gegevene formule $l = \frac{v}{n}$, waarin v de snelheid van het geluid of 332 ellen, n het aantal trillingen en l de golflengte voorstellen, dan zal men nu ook gemakkelijk de golflengte van iederen toon kunnen bepalen. Voor den toon van 32 trillingen in de seconde is de golflengte dus ruim 10 ellen, voor de C van 128 trillingen 2,3 el, voor de A van 853 trillingen 39 duim. Voor den toon van 73700 trillingen, die volgens Despretz de grens der hoorbare toonen uitmaakt, is de golflengte nog minder dan 5 strepen.

136. **Stemvork.** — Daar men, om een toon weêr te vinden, niet altijd de middelen heeft om het daartoe vereischte getal trillingen juist voort te brengen, zoo bedient men zich van de zoogenaamde stemvorken, die met zorg vervaardigd juist den verlangden toon geven. Zij zijn van staal en hebben de gedaante, in fig. 146 aangewezen. Men brengt de stemvork in trilling door haar bij het steeltje vast te houden, en dan met een der uiteinden tegen een vast ligchaam te slaan. Beter nog geschiedt zulks door, zoo als in fig. 146 is aangeduid, een houtje tusschen de beide beenen door te halen. Om het geluid te versterken houdt men haar tegen een vast ligchaam, dat dan mede in trilling geraakt Het best geschiedt dit door de stemvork op eene aan een uiteinde geopende kast te plaatsen, zoo als in de figuur is voorgesteld; de zich daarin bevindende lucht trilt dan mede en versterkt het geluid.

Fig. 146.



De bij de toonkunst doorgaans gebruikte stemvorken geven de A aan, die 853 trillingen zoude moeten hebben; sommige de C van 512 trillingen.

137. **Harmonische toonen.** — De toonen, waarbij het getal der trillingen evenredig is aan de reeks der geheele getallen 1, 2, 3, 4, enz., worden *harmonische* toonen genoemd, omdat men veelal, wanneer de eerste dier toonen vernomen wordt, onder gunstige omstandigheden ook een of meer der andere verneemt. Door middel van de getallen van de toonladder kan men gemakkelijk nagaan, welke deze toonen zijn. Neemt men C als grondtoon aan, dan stelt de octaaf C_2 den toon 2 voor; 3 is de octaaf van de quint G_2; 4 is de dubbele octaaf C_3; 5 is de dubbele octaaf van de groote terts E_2; 6 is de dubbele octaaf van de quint G_2; de toon, door 7 voorgesteld, wordt in de gewone toonladder niet gevonden. (1)

138. **Stooten of zwevingen.** — Wanneer men twee toonen te gelijk voortbrengt, die slechts zeer weinig in hoogte verschillen, dan zal men bemerken, dat het geluid beurtelings eene versterking en eene verzwakking ondergaat, die elkander met regelmatigheid opvolgen, en waaraan men den naam van stooten of zwevingen (in het Fransch *battements*) gegeven heeft.

Dit verschijnsel laat zich gemakkelijk verklaren. Stellen wij dat wij twee toonen hebben, waarvan de een met 128, de andere met 124 trillingen in de seconde overeenkomt. Beginnen de trillingen te gelijk, dan zal, omdat die van den eersten toon schielijker plaats grijpen, weldra het begin van eene trilling van dien toon niet meer plaats hebben te gelijk met het begin eener trilling bij den anderen toon. Na verloop van 32 trillingen van den eersten en 31 van den tweeden toon, zullen weder twee trillingen zamenvallen, en daar zij dan op gelijke wijze werken op de lucht, die het geluid tot ons oor overbrengt, zal er eene versterking van toon plaats hebben. Tusschen die oogenblikken van toonversterking zullen de tegenovergestelde werkingen, waaraan de lucht alsdan is blootgesteld, eene verzwakking van het geluid ten gevolge hebben. Bij deze twee toonen zal men dus 4 versterkingen en 4 verzwakkingen of 4 stooten in eene seconde waarnemen. Met ziet dat het aantal terstond gevonden wordt door den grootsten gemeenen deeler te nemen van het aantal trillingen der beide toonen. Daar de stooten des te duidelijker zijn, naarmate zij minder talrijk zijn, zal men ze des te beter vernemen naarmate de toonen lager en hun onderling verschil geringer is. Proefondervindelijk kan men zich het gemakkelijkst van dit verschijnsel overtuigen door twee groote stemvorken of door twee orgelpijpen, die slechts zeer weinig in toon verschillen. De stooten zijn daarom ook een zeer gemakkelijk middel om zich

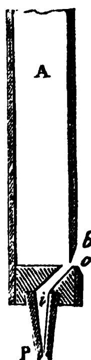
(1) De onder aan de letters geplaatste cijfertjes duiden aan, welke toon bedoeld wordt. De toonen van de eerste octaaf van de toonladder worden aangeduid door C, D, E, enz.; die van de daaropvolgende door C_2, D_2, E_2, enz.

te overtuigen of twee toonen juist even hoog zijn. Een gering verschil, dat anders aan het gehoor ontgaan zoude, wordt bij het gelijktijdig geluidgeven der beide pijpen terstond door die stooten aangewezen.

Is het aantal stooten groot, zoodat het meer dan 32 in de seconde bedraagt, dan zullen deze op zich zelven eenen hoorbaren toon vormen. Hoort men bijv. te gelijk een toon van 512 trillingen en zijne quint, welke 768 trillingen heeft, dan zullen er 256 stooten plaats hebben; men hoort dan te gelijk met de beide toonen een derden toon van 256 trillingen, die hier de lagere octaaf van den grondtoon zal zijn. Zoodanigen toon noemt men den *resulterenden* of *combinatie-toon* van de beide andere.

139. **Trilling der lucht in pijpen.** — In de hiervoren aangehaalde voorbeelden hebben wij wel van de trilling der lucht gesproken, maar het was steeds de trilling van een of ander vast ligchaam, die zich daaraan mededeelde, terwijl het geluid door de lucht tot ons oor werd overgebragt. Wij moeten nu echter ook de trillingen eener luchtmassa beschouwen, die binnen eene onveranderlijke ruimte besloten is, en welke in dat geval niet als overbrengster, maar als oorzaak van het geluid moet beschouwd worden. Alvorens evenwel hiertoe over te gaan moeten wij nog opmerken, dat van een veêrkrachtig ligchaam, dat in trillende beweging is, niet alle deelen gelijkelijk trillen, maar dat het zich doorgaans verdeelt in gedeelten, welke van elkander zijn afgescheiden door punten, lijnen of oppervlakken, welke zich in rust bevinden, en waaraan men den naam van *knoopen* geeft. Aan weêrszijden van eene knoop of knooplijn hebben de trillingen steeds in eene tegenovergestelde rigting plaats; aan het midden van zulk een gedeelte, waar de uitslag of amplitude der trillingen de grootste is, geeft men den naam van *buik*. De hoogte der toonen staat steeds in een naauw verband met de wijze, waarop een trillend ligchaam door de knooplijnen verdeeld is.

Fig. 147.



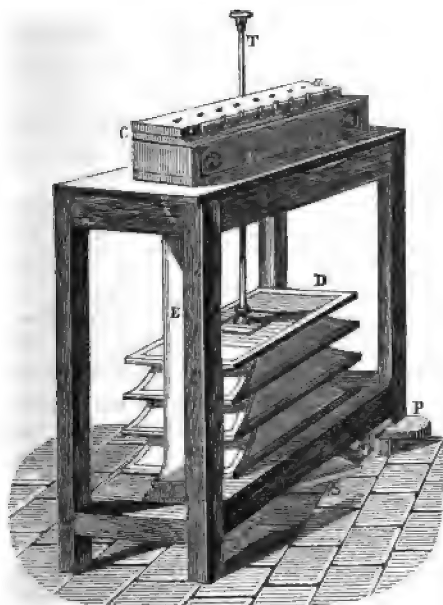
Het eenvoudigste en meest gebruikelijke middel om eene luchtmassa in trilling te brengen bestaat daarin, dat men een luchtstroom tegen een scherpen kant laat aankomen, zooals in fig. 147 in doorsnede is voorgesteld. Door den voet *i* komt de lucht met kracht tegen de scherpe kant *b* aan, welke de *bovenlip* genoemd wordt, terwijl men aan de opening *o* den naam van *mond* gegeven heeft. Daar de lucht met kracht tegen den kant van de lip *b* aankomt, wordt zij zamengedrukt; daarna zet zij zich door de veêrkracht weder uit; zij komt dus niet in eenen aanhoudenden stroom uit de opening, maar er ontstaan trillingen, die zich aan de geheele luchtmassa in de pijp A mededeelen. De grootte van

de opening is niet zonder invloed op het geluid; want hoe digter de scherpe kant der lip zich bij *o* bevindt, des te schielijker zullen de trillingen elkander opvolgen; daarom maakt men ook somtijds aan de orgelpijpen eene inrigting, waardoor de opening grooter of kleiner kan gemaakt worden, en welke dus in staat stelt om den toon naauwkeurig de verlangde hoogte te geven.

Bij de gewone dwarsfluit blaast men de lucht tegen den scherpen kant van de opening aan; deze bekleedt dus daarbij dezelfde plaats als de lip bij de meeste orgelpijpen.

Dat de trillingen van den wand van zoodanige muzijkinstrumenten den toon niet voortbrengen, blijkt daaruit, dat de toon geene verandering of verzwakking ondergaat, wanneer men ze in de hand vasthoudt. Wanneer zij niet al te dun zijn, oefenen zij op de hoogte van den toon geen merkbaren invloed uit; wel echter op den klank. Men kan zich hiervan overtuigen door bijv. drie orgelpijpen van dezelfde afmetingen te nemen, maar waarvan de eene van metaal, de tweede van hout, en de derde van bordpapier is gemaakt; de toonen zullen wel even hoog, maar zeer verschillend in klank en sterkte zijn.

Fig. 148.



140. **Wetten der trillingen in opene en in geslotene pijpen.** — Alvorens over te gaan tot mededeeling der uitkomsten waartoe de onderzoekingen aangaande het verband tusschen de afmetingen der orgelpijpen en de hoogte der voortgebragte toonen geleid hebben, moeten wij nog de aandacht vestigen op een toestel, geschikt om de proeven met alle zoodanige pijpen te kunnen doen. Zoodanig toestel is afgebeeld in fig. 148. Onderaan bij S bevindt zich een blaasbalg, welke door de pedaal P in beweging gebragt zijnde de lucht zamenperst in D. Van hier kan zij zich door de holle buis E naar de kast C begeven, in wier bovenwand zich openingen bevinden, waarin de orgelpijpen of dergelijke toestel-

len geplaatst kunnen worden, doch die van binnen door klepjes gesloten zijn. Door op een der knopjes *a* te drukken wordt het klepje onder de daarmede overeenkomende opening opgeligt, en de lucht heeft een vrijen uitgang. Door op den knop T te drukken kan men den luchtstroom sterker maken, en daardoor ook op den toon van de in de opening geplaatste orgelpijp invloed uitoefenen.

Plaatsen wij nu op eene der openingen eene orgelpijp, die overal gelijke doorsnede heeft en van boven open is. Door de lucht zeer langzaam in te laten stroomen, zal men een lagen toon verkrijgen; laat men die met meer kracht instroomen, dan verkrijgt men hoogere toonen, maar alleen die welke, zoo de grondtoon door 1 wordt aangeduid, door de getallen 2, 3, 4, enz. worden voorgesteld, dus de octaaf, de octaaf der quint, de dubbele octaaf, enz. Heeft men daarentegen eene pijp, die van boven gesloten is, dan zal men, door den luchtstroom te versterken, ook telkens hoogere toonen verkrijgen, doch alleen die, welke worden voorgesteld door de onevene getallen 1, 3, 5, 7, enz. Bovendien zal men bevinden, dat als de beide pijpen dezelfde afmetingen hebben, de grondtoon van de opene pijp juist een octaaf hooger is dan die van de geslotene pijp. Eindelijk nog zal men bemerken, dat als men eene opene pijp heeft, welke den toon 2 aangeeft, deze niet veranderen zal, zoo men de pijp de helft korter maakt, of juist op de helft eene opening maakt; evenzoo kunnen van eene pijp, die den toon 3 geeft, een of twee der bovenste derde deelen weggenomen worden, zonder dat de toon een andere wordt. Alleen zal men de kracht van den luchtstroom eenigzins behooren te wijzigen, om dit verschijnsel te voorschijn te roepen.

Het is niet moeijelijk van deze wetten, welke het eerst ontdekt zijn door Bernoulli (1762), rekenschap te geven. Uit de laatste proef toch blijkt, dat er voor den toon 2 een buik in het midden eener opene pijp is, waar namelijk de lucht geene verdigting noch verdunning ondergaat; want was dit niet het geval, dan zoude op dat punt geene opening kunnen gemaakt worden, zonder dat de toon verandert. Evenzoo zijn er tusschen de beide uiteinden voor den toon 3 twee buiken, voor den toon 4 drie buiken. Aan de uiteinden moeten bovendien altijd buiken zijn, daar de lucht op die plaatsen in onmiddelijke gemeenschap is met de buitenlucht, en dus ook daar geene verandering van digtheid kan plaats hebben. Daaruit volgt, dat de grondtoon van eene orgelpijp eene golflengte heeft gelijk aan de lengte der pijp; de toon 2 heeft dus eene golflengte gelijk aan de helft; de toon 3 eene golflengte gelijk aan een derde der pijp. Dat zich midden tusschen de buiken steeds knoopen bevinden, blijkt uit de volgende proef. In eene glazen buis, of in eene orgelpijp waarvan de wand van glas gemaakt is (Fig. 149), houdt

men door middel van een draad een over een houten ringetje gespannen vliesje A, waarop eenige zandkorreltjes liggen. Door dit hooger of lager in de pijp te houden, wanneer zij geluid geeft, zal men gemakkelijk de plaatsen vinden, waar de beweging der lucht, die zich onmiddelijk aan het vliesje en de daarop liggende zandkorreltjes mededeelt, de sterkste is, en waar zich dus buiken bevinden, alsook die plaatsen, waar de lucht in rust is en dus knoopen aanwezig zijn.

Fig. 149.



Uit de eigenschap, dat de grondtoon van de geslotene pijp een octaaf lager is dan die van de opene pijp, volgt terstond, dat de golflengte tweemaal grooter moet zijn dan de lengte van de geslotene pijp (122). Dit moet daaraan worden toegeschreven, dat de beweging door den bodem wordt teruggekaatst, alwaar wegens de onbewegelijkheid van dezen wel een knoop, maar geen buik kan wezen. Daar bovendien aan het andere uiteinde bij den mond van de pijp altijd een knoop moet zijn, zoo kan het niet anders, of er moeten zich tusschen deze beide altijd een gelijk aantal buiken en knoopen bevinden. Is er van elk een daartusschen, en zijn er dus in het geheel twee knoopen en twee buiken, dan zal de golflengte $\frac{2}{3}$ van de lengte der pijp bedragen; en daar de golflengte van den grondtoon tweemaal de lengte der pijp bedraagt, zal deze nieuwe toon door 3 worden aangeduid. Zijn er tusschen den mond en den bodem twee knoopen en twee buiken, dan bedraagt de golflengte $\frac{2}{5}$ van de lengte der pijp, en de toon zal dus door 5 worden voorgesteld. Van de tegenwoordigheid der buiken op de hier aangewezene plaatsen kan men zich ook weder overtuigen door aldaar openingen in de pijp te maken, welke op de hoogte van den toon geen invloed zullen uitoefenen.

Uit het voorgaande blijkt, dat bij orgelpijpen van dezelfde soort de hoogte van den toon hoofdzakelijk van de lengte der pijpen afhangt, en wel, dat het aantal trillingen in eene seconde daaraan omgekeerd evenredig moet zijn. Om dus de toonen van de toonladder te hebben zal men slechts pijpen behoeven te nemen, wier lengten zich verhouden als de getallen, hierboven (132) voor de lengte der snaren van den sonometer aangewezen. De proef toont echter, dat de toonladder in dit geval niet zuiver is, hetgeen schijnt te moeten worden toegeschreven aan de meer zamengestelde bewegingen, welke de lucht bij den mond en bij het andere uiteinde der pijp schijnt aan te nemen.

Brengt men hetgeen omtrent de toonen der opene en geslotene orgelpijpen

en de golflengte is gezegd, in verband met hetgeen hierboven (135) aangaande deze laatste is opgemerkt, dan is het niet moeijelijk de lengte van eene orgelpijp te bepalen, opdat zij een bepaalden toon geve. Voor den laagsten toon van 32 trillingen is dus eene opene pijp van ruim 10 el, of eene geslotene van 5 el noodig. De C van 512 trillingen wordt voortgebragt door eene opene pijp van 64 duim, of eene geslotene van 32 duim.

141. **Blaas-instrumenten.** — Het zijn niet alleen de orgelpijpen, waarbij de hier vermelde wetten te pas komen, maar al die muzijkinstrumenten, waarbij door inblazing eene zekere kolom of massa lucht aan het trillen gebragt wordt, Bij de trompet, waldhoorn en dergelijke wordt de trillende beweging veroorzaakt door de lippen zelven; deze deelt zich vervolgens mede aan de luchtkolom, die zich in het instrument bevindt. Door de lippen meer of min tegen elkander te drukken kan men het aantal trilliugen en dus ook den toon wijzigen. De luchtmassa binnen in moet echter steeds mede kunnen trillen. Van daar dat het aantal toonen, die door zoodanige instrumenten kunnen worden voortgebragt, beperkt is. Bij de trombone of schuiftrompet kan men, door beide stukken, waaruit deze bestaat, meer of min in elkaar te schuiven, het aantal toonen vermeerderen. De sterke, doordringende toon van deze soort van blaasinstrumenten is hoofdzakelijk verschuldigd aan het wijdere gedeelte aan het uiteinde, dat den naam van *beker* draagt.

Sommige blaasinstrumenten, zooals de dwarsfluit, klephoorn en dergelijke zijn voorzien van gaten, die hetzij door de vingers, hetzij door kleppen kunnen gesloten worden. In verband met hetgeen hiervoren gezegd is, zal men ligtelijk inzien, hoe men, door die openingen te sluiten of geopend te laten, verschillende toonen kan te voorschijn brengen.

142. **Tongpijpen.** — Bij sommige blaasinstrumenten bevindt zich eene bijzondere inrigting, waardoor de lucht in trilling gebragt wordt, en welke bestaat uit een metalen of rieten tongetje, dat door een luchtstroom bewogen wordt. Fig. 150 kan er een duidelijk begrip van geven. Aldaar is *i* het tongetje, dat nagenoeg past in eene opening in een metalen plaatje *cc*, en aan den bovenkant is vastgemaakt. Door een beweegbaren ijzerdraad *r* kan het trillende gedeelte van het tongetje korter of langer gemaakt worden. Het in A afgebeelde gedeelte, dat van binnen hol en van boven met eene opening *o* voorzien is, wordt geplaatst in de houten pijp MN, waarin van onderen door P een luchtstroom kan gebragt worden. Komt de lucht daarin, dan tracht zij door de sleuf *cc* te gaan; het tongetje *i* geraakt dan in trilling en de opening *cc* wordt beurtelings gesloten en geopend. Daardoor geraakt de

geheele luchtmassa in trilling; door het ijzerdraad hooger of lager te plaatsen kan men maken, dat de door het tongetje voortgebragte toon en die van de mede trillende luchtmassa goed overeenkomen. Men zal echter bevinden, dat de toon klimt, naarmate de lucht met meer kracht binnenstroomt.

Fig. 150.





Behalve deze soort van tongetjes heeft men ook nog andere, waar namelijk het tongetje iets grooter is dan de opening, zoodat het niet, zoo als hier, in deze heen en weêr trilt, maar er tegen aan slaat. De toon van die tongpijpen is echter veel minder aangenaam.

Op de opening *o* kan eene kegelvormige of cilindrische buis geplaatst worden, waardoor de klank van den toon eene aanzienlijke wijziging ondergaat.

De tongwerktuigen vindt men bij de clarinet, hoboë, de basson, bij de zoogenaamde harmonica's, en voorts bij verschillende soorten van orgelpijpen, waardoor het geluid van die instrumenten, als ook dat van de menschelijke stem, wordt nagebootst.

143. **Chemische harmonica.** — Wij mogen van de verschillende wijzen, waarop eene luchtkolom in trilling gebragt wordt, niet afstappen, zonder gewag te maken van de zoogenaamde chemische harmonica. Deze bestaat uit eene flesch, waarin waterstofgas ontwikkeld wordt, hetwelk ontwijkt door een naauw buisje, dat door de kurken stop gestoken is. Dit gas wordt, nadat het zich gedurende eenige oogenblikken ontwikkeld heeft, aangestoken en brandt met eene flaauwe vlam. Neemt men nu een aan beide uiteinden geopenden glazen cilinder, en houdt men dien om de vlam, dan verneemt men weldra een helderen en aangenamen toon De oorzaak van dezen toon schijnt daaraan te moeten worden toegeschreven, dat de door de verbranding van het waterstofgas gevormde waterdamp zich schielijk verdigt, waardoor in de nabijheid van de vlam eene nagenoeg luchtledige ruimte ontstaat, die echter terstond weder door de daarnaast gelegene lucht wordt ingenomen. Daar dit verschijnsel zich met groote snelheid herhaalt, geraakt de geheele luchtmassa binnen den cilinder in trilling, en ontstaat er een toon.

144. **Versterking van het geluid door medetrilling eener luchtmassa.** — Wij hebben bij de beschrijving van de stemvork reeds gewag gemaakt van de versterking van het geluid, door haar te plaatsen

op eene holle, aan eenen kant geopende doos. De oorzaak van die versterking bestaat alleen in het medetrillen van de in die ruimte bevatte lucht. Van deze eigenschap kan men zich nog beter overtuigen door den in fig. 151 afgebeelden toestel, door Savart uitgedacht. A is eene metalen klok, die men door een strijkstok geluid laat geven. De toon zal duidelijk, doch niet sterk zijn. B is een kartonnen cilinder, uit twee gedeelten bestaande, die men in elkander schuiven kan. Plaatst men den cilinder in den stand, door de figuur aangewezen, dan zal men bevinden, dat de toon eene aanzienlijke versterking ondergaat. Die versterking zal echter niet altijd even merkbaar zijn; men zal, door de beide kokers meer of min in elkander te schuiven, bevinden, dat bij eene bepaalde lengte van den cilinder de versterking van den toon de grootste is. In dat geval trilt de lucht in dien cilinder op dezelfde wijze als de klok; men noemt dit gewoonlijk *medegalmen*. Draait men den cilinder om, dan verzwakt de toon terstond, ten bewijze, dat wel degelijk het medetrillen der zich daarin bevindende lucht oorzaak is van de versterking.

Fig. 151.



145. **Trilling van snaren.** — Wij hebben hiervoren (132) reeds met enkele woorden gewag gemaakt van het verband tusschen de lengte eener snaar en de hoogte der daardoor voortgebragte toonen. Het is echter niet alleen de lengte der snaren, die op den toon invloed uitoefent, maar ook andere omstandigheden moeten daarbij in aanmerking genomen worden. De wet kan het meest algemeen worden uitgedrukt, door te zeggen, dat het aantal trillingen omgekeerd evenredig is aan de lengte en aan den diameter van de snaar, dat het evenredig is aan den vierkantswortel uit de spanning en omgekeerd evenredig aan den vierkantswortel uit de digtheid. Door spanning verstaat men hier het gewigt, waardoor de snaar gespannen is.

Het is niet noodig omtrent deze wetten in meerdere bijzonderheden te treden. Men kan zich door middel van den hierboven beschreven sonometer (Fig. 145) gemakkelijk van de juistheid overtuigen. Om de snaren duidelijk

geluid te doen geven is het voldoende ze met den vinger uit den evenwigtstoestand te brengen en dan los te laten; nog beter echter kan men de toonen onderscheiden, als men er met een strijkstok langs strijkt.

Aangaande de toonen der snaren valt nog op te merken, dat eene snaar ook andere toonen kan voortbrengen dan die, welke eigenlijk bij hare lengte behooren, wanneer zij namelijk, zonder ergens anders dan aan de uiteinden ondersteund te zijn, zich verdeelt in 2, 3, of meer gelijke deelen, die als 't ware ieder op zich zelf trillen. Alsdan ontstaan de zoogenaamde harmonische toonen. Om dit verschijnsel waar te nemen, is het het doelmatigst om door middel van een ander muzijkinstrument een der harmonische toonen van den grondtoon der snaar aan te geven. De trillingen deelen zich dan door tusschenkomst van de lucht mede aan de snaar, die alsdan een zeker aantal buiken en knoopen vertoont. Men overtuigt zich hiervan, door over de snaar eenige kleine stukjes papier te leggen; daar waar knoopen zijn blijven zij zitten, doch in de andere punten worden zij er afgeworpen, zoodra de trillingen beginnen.

146. **Snaarinstrumenten.** — Bij alle snaarinstrumenten zijn het de snaren, waardoor de hoogte van de toonen bepaald wordt; de klank echter en de meerdere of mindere zuiverheid der toonen, hangt af van de holle kas of klankbodem, die men bij alle snaarinstrumenten aantreft. Deze moet zoodanig zijn, dat de lucht, die zich daarin bevindt, voor alle toonen kan mede trillen. Wij kunnen hier omtrent dit punt niet in meer bijzonderheden treden; het zij voldoende te herinneren aan de moeite, die aan het construeren van eene goede viool verbonden is, om een denkbeeld te geven van de vele bijzonderheden, waarop daarbij de aandacht moet gevestigd zijn.

147. **Trilling van staven.** — Staven, zoowel ronde als platte, kunnen even als snaren aan het trillen gebragt worden. Het gemakkelijkst geschiedt dit, door ze aan het eene uiteinde vast te maken en met een strijkstok langs het andere uiteinde te strijken. Het aantal trillingen is in dat geval evenredig aan de dikte en omgekeerd evenredig aan het vierkant der lengte en aan den vierkantswortel uit de digtheid. Bij platte staven oefent de breedte geen invloed op het aantal trillingen uit.

De trillingen, waarvan tot dusverre sprake is geweest, geschieden in eene rigting loodregt op de rigting der staven; zij heeten daarom doorgaans transversaal-trillingen. Er kunnen echter ook trilingen plaats hebben in de rigting van de lengte, in welk geval zij longitudinaal-trillingen genoemd worden. De daardoor voortgebragte toonen zijn veel hooger, dan die welke eene zelfde staaf voortbrengt, als er transversaal-trillingen plaats hebben. Het gemakkelijkst brengt

men ze voort, door eene staaf van hout, glas of ijzer aan een der uiteinden of in het midden vast te houden, en dan in de rigting van de lengte te wrijven met een wollen lapje met hars; bij eene glazen staaf is een natte doek te verkiezen. Daar waar men de staaf vasthoudt moet noodzakelijk een knoop ontstaan. De wetten der longitudinaal-trillingen zijn eenvoudig; haar aantal is namelijk omgekeerd evenredig aan de lengte, terwijl de dikte en de vorm der dwarsdoorsnede geenen invloed daarop uitoefenen.

Men kan de longitudinaal-trillingen door de volgende eenvoudige proef aanschouwelijk maken. In eene niet al te naauwe glazen buis steke men eene kurk, die er in sluit, doch zonder veel moeite kan heen en weêr bewogen worden. Laat men nu de buis geluid geven, door haar in de rigting der lengte met eene natte doek te wrijven, dan ziet men de kurk zich langzamerhand binnen in de buis in die zelfde rigting bewegen.

148. **Trilling van platen; figuren van Chladni.** — Om platen in trilling te brengen, zet men ze vast en laat ze geluid geven door met een strijkstok langs den kant te strijken. Men kan zich van glazen of van metalen platen bedienen. Het eenvoudigst is het zoodanige plaat in eene klemschroef vast te zetten, zoo als in fig. 152 is voorgesteld.

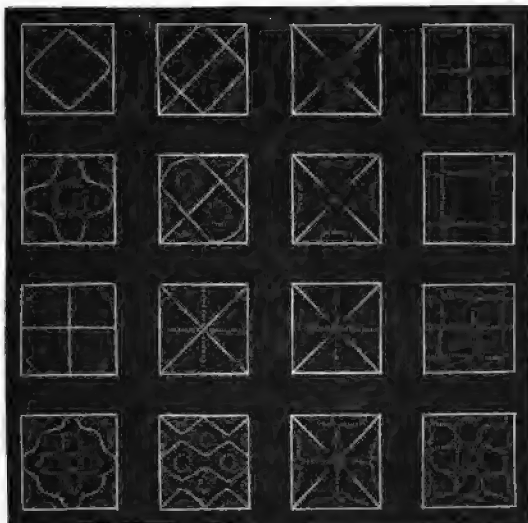
Fig. 152.



In dat geval kan men de plaat vaststellen, waar men verkiest. Door vergelijking van verschillende platen heeft men bevonden, dat het aantal trillingen omgekeerd evenredig is aan de vierkanten der overeenkomstige afmetingen en evenredig aan de dikte der platen. Er is echter nog eene zaak, die eenen grooten invloed uitoefent op de toonen, door platen voortgebragt, namelijk de plaats waar zij vastgemaakt zijn, en die waar zij aangestreken worden. Zoodanige plaat toch zal zich verdeelen in gedeelten, die als 't ware elk op zich zelf in trilling zijn, en door knooplijnen van elkander zijn afgescheiden. Daar waar de plaat bevestigd is, of waar men

ze vasthoudt, moet noodzakelijk eene knooplijn wezen; waar men aanstrijkt is daarentegen de beweging de aanzienlijkste, zoodat daar een buik moet ontstaan. Men kan zich gemakkelijk daarvan overtuigen door op de horizontaal geplaatste plaat gekleurd zand te strooijen. Zoodra de plaat op de aangewezene wijze in trilling gebragt wordt, raakt het zand in beweging, doch alleen op die plaatsen waar buiken ontstaan. Die beweging is zoo aanmerkelijk, dat weldra al het zand zich van de buiken naar de knoopen begeeft; men ziet dan op de plaat verschillende door het zand aangewezene lijnen, die niets anders dan de knooplijnen zijn. Door eene plaat op verschillende wijzen aan te strijken, en ook door haar op verschillende plaatsen vast te houden, kan men de rigting en het aantal der knooplijnen veranderen en zal men dus allerlei figuren verkrijgen, welke men doorgaans naar den natuurkundige, die dit gedeelte der geluidsleer het eerst grondig beoefende, figuren van Chladni noemt. In fig. 153 zijn verschillende dier figuren voor vierkante platen afgebeeld. Als regel kan men daarbij aannemen, dat met de hoogte van den toon ook het aantal knooplijnen toeneemt.

Fig. 153.



Bij cirkelvormige platen krijgt men ook dergelijke figuren. Is de plaat in haar middenpunt bevestigd, dan krijgt men middellijnen. Is zij aan den omtrek vastgemaakt, en strijkt men aan eene in haar midden gemaakte opening, dan kan men concentrische cirkels als knooplijnen verkrijgen.

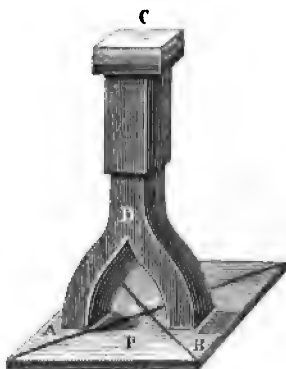
Heeft men het zand vermengd met lycopodium-poeder, dat zeer fijn en ligt is, dan neemt men een merkwaardig verschijnsel waar. Terwijl namelijk het zand zich daar verzamelt, waar de knooplijnen zijn, hoopt zich het lycopodium-poeder op ter plaatse waar zich buiken bevinden; aldaar blijft het

in eene trillende of beter gezegd in eene draaijende beweging, zoo lang de trillingen der plaat voortduren. De oorzaak hiervan schijnt gezocht te moeten worden in de beweging der lucht, die door de trilling der plaat ook in trillende beweging geraakt. Daardoor ontstaan in hare nabijheid luchtstroomingen, die het fijne poeder medeslepen, en elkander ontmoetende het poeder op die ontmoetingspunten doen ophoopen. Zeer duidelijk is dit verschijnsel waar te nemen bij eene in het midden bevestigde cirkelvormige schijf.

Tot dezelfde soort van trillende ligchamen kunnen ook nog de gespannen vliezen of membranen gebragt worden, waarvan wij reeds eenige malen gewag gemaakt hebben. Deze geven echter alleen dan een merkbaar geluid, wanneer er tegen geslagen wordt, zooals bij trommen, tambourins en dergelijke het geval is. In dat geval zijn echter de knooplijnen minder gemakkelijk na te gaan. Dit geschiedt beter, als men een gespannen vlies, (waarvoor men een dun papier nemen kan, over een houten raam gespannen) in de nabijheid houdt van eene klok, die een sterk geluid geeft. Heeft men op het papier wat gekleurd zand gestrooid, dan ziet men dit weldra zich op de knooplijnen verzamelen, even als bij de platen het geval is.

149. **Interferentie van het geluid.** — Er is nog een verschijnsel, dat met de leer der geluidstrillingen in een naauw verband staat, en dat eigenlijk reeds eerder had moeten vermeld worden; wij lieten het echter tot nog toe onaangeroerd, omdat wij te gelijk daarmede eene eenvoudige proef wilden vermelden, die echter niet zoude begrepen worden, zoo niet de leer van de trillingen der platen eerst was verklaard geworden. Deze proef is de volgende. Men neemt eene kartonnen buis, van de in fig. 154 voorgestelde gedaante, die aan hare beneden uiteinden A en B open is. Zij is geheel hol, doch van boven gesloten door een vlies C. Deze buis houdt men digt boven eene in 't midden vastgemaakte vierkante glazen of metalen plaat P, die men zoodanig heeft aangestreken, dat er zich twee knooplijnen in de rigting der diagonalen vormen. Dit zal men het gemakkelijkst verkrijgen, door de plaat aan een der hoekpunten met den vinger vast te houden, en haar in 't midden van eene der zijden aan te strijken. De trilling van de deeltjes der plaat deelt zich mede aan de lucht, die zich daarboven in den koker

Fig. 154.



bevindt, en plant zich daarin voort, tot dat deze beide bewegingen elkander in D ontmoeten, en gezamenlijk voortgaan tot aan het gespannen vlies C. Houdt men deze buis, op de wijze als in de figuur is aangewezen, boven de twee tegenovergestelde buiken A en B van de plaat, dan zullen zandkorreltjes, op het vlies C gelegd, terstond in beweging geraken. Houdt men daarentegen het eene been van de buis boven eene buik, en het andere boven eene buik, die slechts door ééne knooplijn van de eerste is gescheiden, zooals A en P, of P en B, dan neemt men bij de zandkorreltjes geene beweging waar.

De reden van dit verschijnsel ligt bij de hand. Blijkens het vroeger (139) opgemerkte zullen de deeltjes aan weêrskanten van eene knooplijn zich op hetzelfde oogenblik in tegenovergestelde trillende beweging bevinden; dit zal bijv. het geval zijn met de deeltjes in A en die in P. Op hetzelfde oogenblik dus, dat de lucht boven A eene verdunning ondergaat, wordt die boven P′ verdigt, terwijl daarentegen die boven B wederom verdund wordt. In den door de figuur voorgestelden stand, zal dus de lucht bij D van beide kanten tegelijk eene verdunning of eene verdigting ondergaan; de trilling wordt dus versterkt, en moet zeer merkbaar zijn aan de beweging der zandkorreltjes. Is daarentegen het eene been boven A, het andere boven P geplaatst, dan zal elk luchtdeeltje in D van den eenen kant eene verdigting, van den anderen eene verdunning ondervinden, waarvan het gevolg moet wezen, dat deze beide bewegingen elkander vernietigen, en de zandkorreltjes in C in rust blijven. Het laat zich echter inzien, dat deze vernietiging alleen dan volkomen zal zijn, als de trillende bewegingen beiden door denzelfden toon veroorzaakt zijn en gelijke amplitude of uitslag hebben. Deze onderlinge vernietiging der trillende beweging wordt *interferentie* genoemd; ook zelfs dan, wanneer het geluid niet geheel maar slechts gedeeltelijk door de wederkeerige werking der beide geluidgolven vernietigd wordt, blijft men het verschijnsel door dien naam aanduiden.

HOOFDSTUK VII.

W A R M T E.

---

150. **Inleiding.** — Het onderscheid tusschen warmte en koude is ieder bekend; komt de hand in aanraking met een of ander voorwerp, dan ondervindt zij een gevoel van warmte of van koude, naar gelang dat voorwerp warmer of kouder is dan zij zelve, of de warmte schielijker aan de hand ontneemt of aan haar afgeeft. Het is ons echter niet voldoende te zeggen, dat een voorwerp naar ons gevoel warm of koud is; wij moeten uitdrukkelijk nagaan, wat warmte is, hoe zij van het eene ligchaam overgaat in het andere, welke hare uitwerking is op de ligchamen, en welk gebruik men van hare eigenschappen kan maken.

Alvorens de eerste vraag te kunnen beantwoorden, is het noodig de eigenschappen van de warmte meer van nabij te leeren kennen; ook zullen wij, eer wij daartoe kunnen overgaan, meer bepaaldelijk de wijzen moeten leeren kennen, waarop warmte ontwikkeld wordt. Eene korte beschouwing echter van de twee onderscheidene theorien, waardoor men heeft trachten te verklaren, wat warmte eigenlijk is, laten wij hier voorafgaan.

Men heeft langen tijd de warmte beschouwd als eene stof; men sprak van *warmtestof*, die van het eene ligchaam in het andere overging. Die overgang onderstelde men, dat kon plaats hebben hetzij door de luchtledige ruimte, hetzij door tusschenkomst van de moleculen der ligchamen. Is de warmte iets stoffelijks, dan moet een ligchaam des te zwaarder worden, naarmate het meer warmte in zich opneemt. Proeven, in 't werk gesteld om dit te onderzoeken, hebben evenwel tot een ontkennend antwoord geleid. Ieder ligchaam behoudt hetzelfde gewigt, onverschillig of het koud of warm is. Men noemde daarom de warmte eene *onweegbare* of *imponderable* stof. Zeer langen tijd heeft men deze benaming behouden, hoewel zij in zich zelve eene tegenstrijdigheid bevat; al wat stoffelijk is moet gewigt hebben, eene onweegbare stof is dus eigenlijk een onding. Men begint thans meer en meer van deze theorie

terug te komen, en houdt de warmte voor niets anders, dan het resultaat van trillingen òf van de moleculen der ligchamen zelven, òf van eene overal verspreide uiterst fijne en ijle stof, die zich zoowel tusschen de moleculen der ligchamen als in het luchtledige bevindt, en aan welke men den naam van *ether* geeft. Volgens deze theorie wordt de warmte beschouwd als een *bewegingstoestand;* beweging kan zich dus in sommige omstandigheden als warmte uiten. Wij zullen later het verband tusschen deze beide verschijnselen leeren kennen en zien, hoe zelfs beweging kan overgaan in warmte en omgekeerd. Eene volledige beschouwing der overige warmteverschijnselen moet evenwel voorafgaan. Wij zullen daarom eerst nagaan, van welke middelen men zich bedient om den warmtegraad of de *temperatuur* der ligchamen te meten; daarna de wetten opsporen, volgens welke de warmte overgaat, hetzij van het eene ligchaam tot een ander, dat er niet mede in aanraking is, hetzij tusschen de moleculen van een zelfde ligchaam; ten laatste nagaan, welke uitwerking de warmte op de stof zelve heeft.

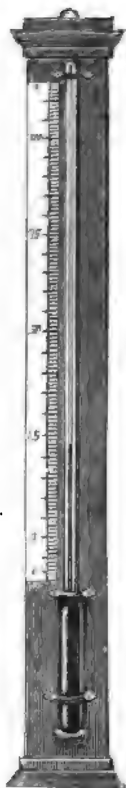
A. BEPALING VAN DEN WARMTEGRAAD.

151. **Thermometer.** — Hoewel men een niet al te gering verschil in warmte bij twee ligchamen zeer goed door het gevoel kan bemerken, zoo is het echter even onmogelijk om dit naauwkeurig te bepalen, als om den warmtegraad van elk ligchaam op zich zelf te meten, vooral ook omdat zoodanige bepaling altijd slechts betrekkelijk zijn kan, en afhankelijk is van den warmtegraad der hand, waarmede het onderzoek wordt in 't werk gesteld. Is onze hand koud, dan zal laauw water ons warm schijnen; is de hand zeer warm, dan zal hetzelfde water een gevoel van koude teweeg brengen. Men heeft daarom werktuigen vervaardigd, waardoor de temperatuur naauwkeuriger kan bepaald worden; het eenvoudigste van deze is de *thermometer.* Deze bestaat uit eene geslotene glazen buis, aan een harer uiteinden voorzien van een bol of een hollen cilinder, waarin zich eene vloeistof bevindt. In fig. 155 is zoodanige toestel afgebeeld, die, om er meer stevigheid aan te geven, op een plankje bevestigd is, waarop naast de buis eene verdeeling is aangebragt. De vloeistof in de buis is doorgaans kwikzilver, somtijds ook alcohol, waaraan men, door er eene kleurstof in op te lossen, eene roode kleur gegeven heeft. Kwikzilver heeft het voordeel van slechts bij een zeer hoogen warmtegraad te koken, alcohol dat van zelfs bij de strengste koude niet te bevriezen.

Het gebruik van den thermometer berust op de eigenschap, dat alle lig-

chamen zich door de warmte uitzetten; van deze eigenschap, die wij eerst later meer bepaaldelijk zullen beschouwen, hebben wij reeds meermalen melding gemaakt.

Fig. 155.



Het best zal men zich een denkbeeld kunnen maken van de werking en inrigting der thermometers, als men nagaat hoe ze vervaardigd worden. Men neemt een zeer naauw glazen buisje, welks diameter overal even groot is; aan een zijner uiteinden blaast men een bolletje of hol cilindertje. Houdt men dit laatste in de vlam van eene spirituslamp, dan zal zich de lucht, die zich er in bevindt, door de warmte uitzetten en gedeeltelijk ontwijken. Terwijl het nog warm is, houdt men het buisje met het opene uiteinde naar beneden in een glas met kwikzilver; naarmate de lucht, die zich er in bevindt, afkoelt en zich zamentrekt, zal door de drukking der buitenlucht het kwikzilver in het buisje stijgen; er zal zelfs, indien de lucht genoegzaam verdund was, een weinig kwikzilver in het bolletje komen. Is dit het geval, dan keert men de buis om en verwarmt het bolletje met het zich daarin bevindende kwikzilver andermaal. Het kwikzilver geraakt dan aan het koken, en door de kwikdampen wordt alle lucht uitgedreven, zoodat, als men de buis nu weder omgekeerd in het kwikbakje plaatst, zij zich bij bekoeling geheel met kwikzilver vult. Nu wordt de buis uit het bakje genomen en een weinig verwarmd, zoodat ongeveer twee derde van het kwikzilver, dat zich in het naauwe gedeelte van de buis bevindt, er uit wordt gedreven; daarna wordt het uiteinde toegesmolten, voordat het kwikzilver zich nog bij bekoeling heeft kunnen terugtrekken, en dus zonder dat er lucht in kon komen. Wanneer het kwikzilver zich dan terugtrekt, ontstaat er boven in de buis eene ledige ruimte, zooals in fig. 156 is afgebeeld.

In plaats van de buis in een kwikbakje te dompelen, kan men ook aan haar open uiteinde eene trechtervormige verwijding maken, waarin men een weinig kwikzilver schenkt, zooals bij A in fig. 157; bij verwarming van den cilinder B ontwijkt de lucht daaruit, en zal er dus bij de bekoeling eenig kwikzilver door de naauwe buis onder in den hollen cilinder B komen. Overigens is de bewerking nagenoeg dezelfde.

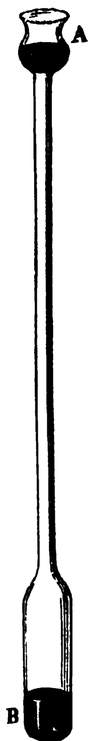
Op deze wijze heeft men een werktuig verkregen, waaraan men de veranderingen van temperatuur kan waarnemen; bij verwarming toch zet het kwikzilver zich uit en klimt in de naauwe buis; bij bekoeling zal het daarin

dalen. Had men alleen een gedeeltelijk met kwikzilver gevuld naauw buisje, dan zoude, daar de uitzetting door de warmte slechts gering is, de temperatuur-verandering ter naauwernood merkbaar zijn. Door echter met het naauwe buisje een ruimer reservoir te verbinden, en dus de hoeveelheid der vloeistof aanzienlijk te vermeerderen, zal de verplaatsing, die toch altijd in het naauwe gedeelte waargenomen wordt, veel aanzienlijker wezen. Men zal ligt inzien, dat hoe grooter het bolletje en hoe naauwer de buis is, des te duidelijker eene geringe verandering in temperatuur zal worden aangewezen.

Fig. 156.



Fig. 157.

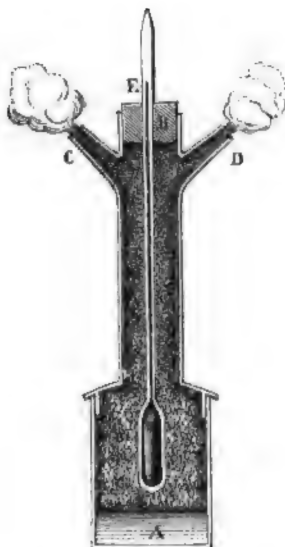


152. **Thermometer-schalen.** — Om evenwel den warmtegraad, of eigenlijk het verschil in temperatuur van twee ligchamen te kunnen meten, moet men met dit werktuig eene schaal verbinden, waarop deelen van eene bepaalde grootte zijn aangebragt. Om die schaal zoo te kunnen inrigten, dat de waarnemingen met verschillende werktuigen gedaan onderling vergelijkbaar zijn, is het noodig ten minste twee vaste punten aan te nemen. Voor het eerste van deze neemt men den warmtegraad, waarbij ijs van den vasten tot den vloeibaren toestand overgaat, voor het tweede dien, waarbij water begint te koken.

Om het eerste punt juist te bepalen neemt men een bak met water, waarin men eenige kleine stukken ijs of sneeuw legt, zoodat dit in eenen langzaam smeltenden toestand verkeert. Hierin houdt men den thermometer onder gedurig omroeren, en teekent op de glazen buis naauwkeurig het punt aan, waar het kwikzilver blijft staan. Dit punt noemt men het *nulpunt*, het *smeltpunt*, of ook wel, ofschoon minder juist, het *vriespunt*. Om het tweede vaste punt te bepalen, bedient men zich gewoonlijk van een blikken vat, van den in fig. 158 aangewezen vorm. Onder bij A bevindt zich zuiver water; boven is eene kurk B aangebragt, waardoor men den thermometer zoo heeft gestoken, dat de cilinder digt boven de oppervlakte van het water komt. Brengt men nu het water aan het koken, dan vult het geheele vat zich met damp, die bij C en D ontwijkt; het kwikzilver ze zich uit en blijft bij een bepaald punt E staan, dat men op de buis aan-

teekent. Men moet zorgen, dat de damp gedurende deze geheele bewerking vrij kan ontsnappen, en behoort bovendien de proef te doen, terwijl de barometer 76 duim aanwijst; wij zullen later de redenen van het noodzakelijke dezer voorwaarde leeren kennen. Het aldus verkregene punt noemt men het *kookpunt*.

Fig. 158.



De twee op die wijze aan de thermometerbuis aangeteekende punten zijn inderdaad, zoo als later blijken zal, vaste punten; om eene schaal te construeren behoeft men dus slechts hunnen afstand in een zeker aantal gelijke deelen te verdeelen; deze deelen, die men graden noemt, zullen dan ook gelijke temperatuur-verschillen aanduiden, zoo men althans zorg heeft gedragen eene buis te gebruiken, die overal even wijd is.

Het laat zich gemakkelijk inzien, dat het vrij onverschillig is, in hoeveel deelen men den afstand tusschen de twee vaste punten verdeelt. Om evenwel de verschillende opgaven onderling te kunnen vergelijken, is het noodig hierbij een zelfden grondslag aan te nemen. De meest gebruikelijke verdeeling is die van Celsius, een Zweedsch natuurkundige (1742), die den afstand tusschen de twee vaste punten in 100 gelijke deelen verdeelde, zoodat het smeltpunt van ijs door 0° en het kookpunt van water door 100° aangewezen wordt. Boven het kookpunt en beneden het smeltpunt worden even groote verdeelingen of graden aangebragt; die beneden het smeltpunt worden door negatieve getallen aangewezen. De graden volgens de honderddeelige schaal van Celsius, worden meestal aangeduid door achter het cijfer eene C te plaatsen. Overal, waar tot dus verre in dit leerboek opgave van temperatuur is geschied, is de verdeeling van Celsius, gewoonlijk de honderddeelige genoemd, gebruikt, ook dan, wanneer de letter C niet achter de cijfers is gevoegd.

Réaumur, een Fransch natuurkundige (1739), verdeelde dezelfde ruimte in 80 graden; bij hem is ook 0° het smeltpunt, doch 80° het kookpunt. Een graad van de honderddeelige schaal bedraagt dus $\frac{4}{5}$ van een graad van de schaal van Réaumur. Even als Celsius, duidt hij de graden onder 0 door negatieve getallen aan; 12°R komen dus overeen met 15°C, — 6°R met — 7,°5C.

Nog eene andere verdeeling is die van Fahrenheit (1724), een Duitscher,

die den afstand tusschen het smeltpunt en het kookpunt in 180 graden deelde. Hij plaatste echter bij het smeltpunt niet het cijfer 0, maar 32, zoodat het kookpunt bij hem door 212° wordt aangewezen. Wil men dus graden van den honderddeeligen thermometer herleiden tot graden volgens Fahrenheit, dan moet men ze eerst vermenigvuldigen met $\frac{9}{5}$, en bij de uitkomst nog 32 optellen. Zoo komen bijv. 20°C overeen met 68°F, — 4°C met + 24°,8F, — 24°C met — 11°,2 F enz. Moet men omgekeerd graden van Fahrenheit herleiden tot graden volgens Celsius of volgens Réaumur, dan moet men er eerst 32 van aftrekken, en de rest in het eerste geval met $\frac{5}{9}$, in het andere met $\frac{4}{9}$ vermenigvuldigen.

Heeft men een thermometer op de hier beschrevene wijze vervaardigd, dan zal men na verloop van eenigen tijd, bijv. na een paar jaren, bevinden, dat het nulpunt niet meer overeenkomt met de temperatuur, waarbij ijs of sneeuw smelt; dompelt men hem daarin, dan zal hij niet 0° maar een hooger punt aanwijzen. De oorzaak daarvan schijnt te zijn, dat het glas, na de sterke verhitting, waaraan men het blootgesteld heeft bij het vullen met kwikzilver, niet dan na langen tijd tot zijn oorspronkelijken toestand terugkeert. Men doet daarom wel, de met kwikzilver gevulde buis geruimen tijd te laten liggen, alvorens de vaste punten te bepalen en de verdeeling aan te brengen. In allen gevalle is het noodig, zoo men naauwkeurige waarnemingen te doen heeft, zich van tijd tot tijd van de juistheid van den thermometer te overtuigen, door hem zoowel aan de temperatuur van kokend water, als aan die van smeltende sneeuw bloot te stellen, en na te gaan of voor die punten nog de juiste temperatuur aangewezen wordt. De kwikthermometers zijn geschikt voor temperaturen tusschen — 35° C. en + 340° C. Bij — 40° C. bevriest het kwikzilver, en bij + 350° C kookt het; in de nabijheid van die warmtegraden heeft de uitzetting niet meer die gelijkmatigheid, welke bij middelmatige temperaturen aan het kwikzilver eigen is.

Alcohol-thermometers worden op dezelfde wijze vervaardigd als kwik-thermometers; ook het nulpunt wordt op gelijke wijze bepaald. Daar echter alcohol reeds kookt bij eene temperatuur van 79°C, kan het kookpunt van water er niet op aangewezen worden. De graden boven het nulpunt moeten dus bepaald worden door vergelijking met een kwikthermometer; dit is bovendien noodzakelijk, omdat de alcohol zich niet zoo gelijkmatig uitzet, en men dus, alvorens tot eene verdeeling in graden over te gaan, meerdere punten door vergelijking moet bepalen. Deze bijzonderheid maakt, dat over het algemeen kwikthermometers te verkiezen zijn boven alcohol-thermometers, vooral als men niet de zekerheid heeft, dat bij de vervaardiging dezer laatste verscheidene punten door vergelijking met

een goeden thermometer bepaald zijn. Tot aanwijzing van zeer lage temperaturen is echter de alcohol-thermometer bijzonder geschikt, daar men, zoo als wij boven reeds opmerkten, nog niet heeft kunnen slagen om alcohol te doen bevriezen.

Wij moeten hier nog opmerken, dat de therm ometer geen werktuig is om den volstrekten warmtegraad van een of ander voorwerp te bepalen, maar eenvoudig om het verschil in temperatuur van twee of meer ligchamen aan te wijzen. Eene volstrekte bepaling van den warmtegraad is uit den aard der zaak onmogelijk; zegt men dus dat een ligchaam eene temperatuur heeft van 20°C, dan duidt men daarmede eigenlijk niets aan, dan dat het de temperatuur van smeltende sneeuw overtreft met 20 graden, en wel zoodanige graden, als er 100 gelegen zijn tusschen de temperatuur waarbij sneeuw overgaat in water en die waarbij water begint te koken.

153. **Lucht-thermometers.** — Daar de uitzetting van de lucht veel aanzienlijker is dan die van vloeistoffen, zoo als kwikzilver en alcohol, maakt men ook wel daarvan gebruik om een gering verschil in warmtegraad aan te wijzen. Men neemt te dien einde een glazen bol met eene daaraan verbonden naauwe buis, die aan haar uiteinde open is. Binnen in die buis heeft men een klein vochtdruppeltje gebragt, waardoor de lucht in de bol is afgescheiden van de buitenlucht. Wordt nu de bol en dus ook de zich daarin bevindende lucht verwarmd, dan verplaatst zich het vochtkolommetje. Daar de uitzetting der lucht veel aanzienlijker is dan die van het glas (later zullen wij die uitzetting leeren bepalen), zoo zal eene zeer geringe verandering van temperatuur terstond worden aangewezen; lucht-thermometers zijn daarom zeer gevoelig. Eene dergelijke inrigting verkrijgt men, wanneer men de hier vermelde glazen buis in den in fig. 159 aangewezen stand dompelt in een bakje met een gekleurd vocht, en dan, door den bol te verwarmen, de zich daarin bevindende lucht doet uitzetten en gedeeltelijk ontwijken. Bij bekoeling stijgt het vocht in de buis tot een punt A. Verandering van temperatuur, die zich mededeelt aan de lucht in den bol B, zal het vochtkolommetje doen stijgen of dalen. Door er eene schaal achter te plaatsen, wier verdeelingen gemaakt zijn door vergelijking met een gewonen thermometer, zal men zelfs de temperatuur in graden kunnen aanwijzen. Van eene dergelijke inrigting, als de hier beschrevene en afgebeelde, was ook de eerste thermometer, welke door onzen landgenoot Cornelis Drebbel van Alkmaar, die doorgaans voor den uitvinder gehouden wordt, werd zamengesteld omstreeks het jaar 1638.

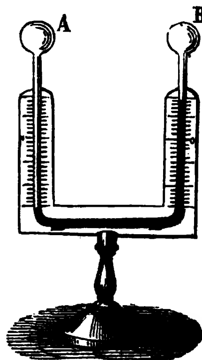
Fig. 159.



Het schijnt evenwel, dat Galilei omstreeks denzelfden tijd, zoo niet reeds vroeger, een dergelijk werktuig heeft vervaardigd.

154. **Differentiaal-thermometer.** — De aanwijzingen der beschrevene lucht-thermometers zijn afhankelijk van de meerdere of mindere drukking der buitenlucht. Leslie (1800) heeft er een anderen uitgedacht, die dit gebrek niet heeft, en gewoonlijk *differentiaal-thermometer* genoemd wordt. Deze, in fig. 160 afgebeeld, bestaat uit twee bollen, door eene buis verbonden, waarin zich een gekleurd vocht bevindt; deze buis is bevestigd op een houten voet, en achter haar bevindt zich eene dubbele verdeelde schaal. Door den eenen bol meer dan den anderen te verwarmen, laat men lucht van den eenen in den anderen overgaan, zoolang tot dat, wanneer zij bekoeld zijn, het vocht in beide armen even hoog staat. Stelt men nu een der bollen, A bijv. bloot aan eene temperatuur die 5 graden hooger is (waarvan men zich door middel van eenen gewonen thermometer kan overtuigen), dan zal zich de vochtkolom verplaatsen; zij zal in den linker arm dalen en in den anderen klimmen. Bij de plaats, waar zij dan staan blijft, maakt men een teeken, en verdeelt den afstand tusschen dit punt en het oorspronkelijke in 5 gelijke deelen; elk dezer deelen zal dus met een graad overeenkomen. Op het overige gedeelte der schaal maakt men even groote verdeelingen.

Fig. 160.

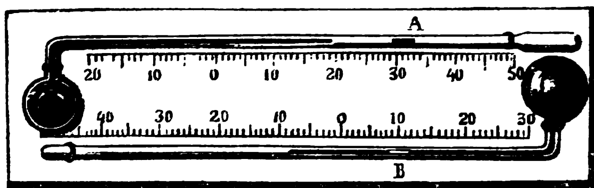


De *thermoscoop* van Rumford (1804) verschilt slechts weinig van den differentiaal-thermometer van Leslie. Het voorname onderscheid bestaat daarin, dat de verdeelingen zijn aangebragt bij het onderste horizontale gedeelte, en dat zich in de buis, in plaats van eene langere vochtkolom, slechts een klein kolommetje van eenige strepen bevindt. De regeling en de aflezing geschiedt op eene dergelijke wijze, als bij den toestel van Leslie.

155. **Maximum- en minimum-thermometer.** — Het is soms van belang de hoogste of laagste temperatuur te kennen, welke de lucht of eene andere middenstof in een zeker tijdsverloop gehad heeft. De gewone thermometers zijn daartoe niet geschikt, daar zij bij verandering van temperatuur ook van aanwijzing veranderen, en men ze dus gedurende het geheele tijdsverloop onophoudelijk zoude moeten waarnemen. Rutherford (1794) heeft thermometers uitgedacht, die de hoogste en de laagste temperatuur blijven aanwijzen; zij zijn op de volgende wijze ingerigt.

Op een plankje (Fig. 161) zijn twee thermometers in horizontalen stand bevestigd. De bovenste is een kwikthermometer, in wiens buisje zich een stalen staafje A bevindt, dat gemakkelijk daarin kan heen en wêer glijden, als men den thermometer uit den horizontalen stand brengt. Laat men

Fig. 161.



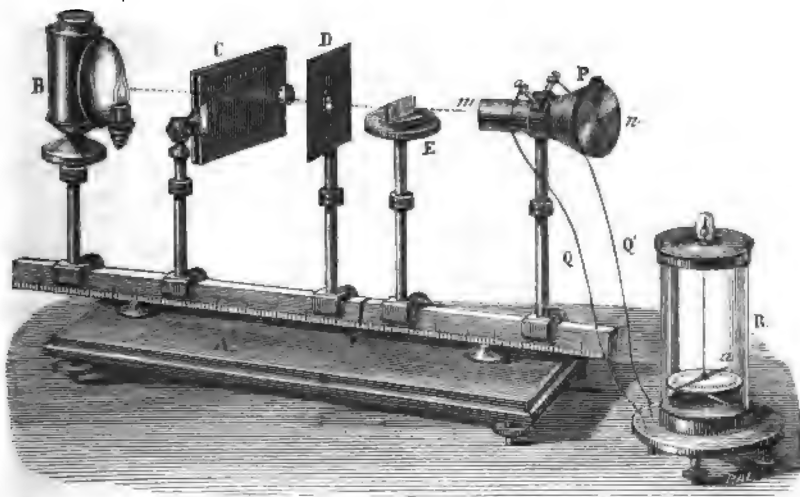
dit staafje, door den thermometer schuins te houden, tegen het kwikzilver aan komen, dan zal het, als de temperatuur toeneemt, door het kwikzilver naar den regterkant gedreven worden; daalt daarentegen de temperatuur, dan blijft het liggen, al trekt zich het kwikzilver terug. Het punt, waar het is blijven liggen, wijst dus de hoogste temperatuur aan; in onze afbeelding is die 33° C. De andere op het plankje bevestigde is een alcohol-thermometer, in welks buisje zich bij B een klein staafje van glas of émail bevindt. Door de adhaesie van het vocht wordt dit medegenomen, als de alcohol bij het dalen van de temperatuur zich terugtrekt, terwijl het liggen blijft, als de alcohol zich weder uitzet; het spreekt van zelf, dat er tusschen het staafje en den binnenwand van het buisje genoegzame ruimte moet zijn, om het vocht door te laten. De plaats, waar het staafje is blijven liggen, in de figuur — 8°C, duidt het minimum van temperatuur aan. De bollen moeten zich elk aan een verschillenden kant van het plankje bevinden, daar men om de staafjes aan de uiteinden der vochtkolommen te brengen, den eenen thermometer met den bol naar beneden, den anderen met den bol naar boven moet houden.

Eenige andere inrigtingen om het maximum van temperatuur aan te wijzen, kunnen wij hier niet vermelden zonder al te uitvoerig te worden. Later, als wij meer bepaaldelijk de uitzetting door de warmte behandelen, zullen wij nog van andere toestellen gewagen, waarmede men zeer hooge temperaturen meten kan.

156. **Thermo-multiplicateur.** — Behalve de hier beschrevene toestellen is er nog een ander, waarmede men met groote naauwkeurigheid een gering verschil in temperatuur kan meten, en die, zoo als wij zien zullen,

bij vele proefnemingen over de warmte van groot nut is, namelijk de zoogenaamde *thermo-multiplicateur* van Melloni. Wij kunnen ons hier nog niet bezig houden met eene naauwkeurige verklaring van de wijze, waarop deze toestel werkt, daar zijne werking hoofdzakelijk berust op eigenschappen, die wij eerst later zullen leeren kennen, als wij de leer der electriciteit behandelen. Wij zullen evenwel zoo veel mogelijk de inrigting en het gebruik van dit werktuig aanduiden.

Fig. 162.



Op eene bank A (Fig. 162) bevinden zich verschillende standaards, die alle op een verdeeld metalen liniaal in eene regte lijn geplaatst kunnen worden. B is eene brandende lamp, die men echter door elke andere warmtebron kan vervangen; C en D zijn schermen en E is een tafeltje, waarop het een of ander voorwerp kan geplaatst worden. In den toestel P, welke men eene thermo-electrische zuil of kolom noemt, bevinden zich op eene bijzondere wijze aan elkander gesoldeerde staafjes bismuth en antimonium, waarmede de koperdraden Q en Q' verbonden zijn, welke naar den multiplicateur in R geleiden. Hoe deze ingerigt is, zullen wij later leeren kennen; thans zij het voldoende op te merken, dat daarin eene magneetnaald *a* opgehangen is, die zich vrij in een horizontaal vlak bewegen kan boven eenen cirkel, wiens omtrek in graden verdeeld is. Zijn nu de uiteinden *m* en *n* van de thermo-electrische kolom P beide geopend, en

aan twee even warme warmtebronnen blootgesteld, dan blijft de naald *a* in R onbewegelijk; wordt daarentegen de kant *m* meer of minder dan *n* verwarmd, dan wijkt de naald terstond af, geraakt in eene schommelende beweging en blijft eindelijk staan in eenen stand, die met den oorspronkelijken evenwigtsstand een grooteren of kleineren hoek maakt. Is die afwijking niet grooter dan 35°, dan mag men, op grond van naauwkeurige proeven, aannemen, dat de temperatuur-verschillen evenredig zijn met de afwijkingen. Stellen wij bijv. dat men de uiteinden *m* en *n* blootgesteld heeft aan twee verschillende warmtebronnen en dat de naald eene afwijking van 5° heeft aangewezen; vervangt men nu eene dier warmtebronnen door eene andere, en vindt men dan eene afwijking van 10°, dan mag men aannemen, dat het verschil in temperatunr tusschen de twee laatste warmtebronnen het dubbel bedroeg van dat tusschen de beide eerste.

157. **Warmte-eenheid.** — Terwijl men zich van de voorgaande middelen bedienen kan, om het verschil in warmtegraad te meten, zoo is het ook dikwijls noodig, dat men de hoeveelheden warmte onderling kunne vergelijken, die vereischt worden om eene zekere uitwerking teweeg te brengen. Men zal gemakkelijk inzien, dat hier geen sprake kan zijn, om die warmtehoeveelheid op zich zelve te meten, maar dat men zich van deze spreekwijze slechts eenvoudigheidshalve en bij wijze van vergelijking bedient. Het zal dan ook voldoende zijn als eenheid eene zekere hoeveelheid warmte aan te nemen, die eene bepaalde uitwerking heeft. Men neemt daarvoor gewoonlijk de hoeveelheid warmte, die noodig is om een pond of eene kan zuiver water van 0°C tot 1°C te brengen. Deze hoeveelheid warmte noemt men doorgaans *warmte-eenheid*.

B. VOORTPLANTING VAN WARMTE DOOR UITSTRALING.

158. **Uitstraling van warmte in het luchtledige.** — Wij hebben reeds de opmerking gemaakt, dat de warmte zich kan voortplanten, hetzij van een molecule van een ligchaam tot de naastliggende, hetzij door de ruimte op grootere afstanden. Het is deze laatste wijze van voortplanting, die men *warmtestraling* noemt, welke wij in de eerste plaats zullen nagaan.

Dat warmte zich op groote afstanden kan voortplanten, ondervinden wij gedurig, als wij de warmte der zonnestralen gevoelen, of in de nabijheid van een gloeijend voorwerp komen. Die warmte is van licht vergezeld; doch ook die, welke niet met lichtverschijnselen gepaard gaat, en daarom gewoonlijk

duistere warmte genoemd wordt, straalt van alle ligchamen uit. Dat daartoe niet de tusschenkomst van de lucht vereischt wordt, maar dat de warmtestraling ook in het luchtledige plaats heeft, kan uit de volgende proef blijken. Men neemt eene ten minste 8 palm lange buis, aan wier uiteinde zich een bol bevindt, waarin men een thermometer luchtdigt bevestigd heeft (Fig. 163). Deze buis vult men, na haar in de nabijheid van den bol bij A vernaauwd te hebben, met kwikzilver en keert haar om in een kwikbak B; men verkrijgt dan eigenlijk een barometer, en dus in den bol boven het kwikzilver eene luchtledige ruimte. Door eene sterke vlam met eene blaaspijp tegen de buis bij A te doen komen, brengt men het glas tot smelten, en zal het bolletje C van de buis kunnen verwijderen, zonder dat er lucht in komt. Op deze wijze verkrijgt men dus een luchtledigen bol met eenen thermometer er in. Dompelt men dien in warm water, dan ziet men terstond den thermometer stijgen; de warmte heeft zich dus van de oppervlakte van den bol door de luchtledige ruimte naar den thermometer voortgeplant (*) Men zoude welligt meenen, dat de voortplanting door het glas van den bol en dat van den thermometer geschiedt; wij zullen echter later zien, dat de voortplanting der warmte door het glas zoo langzaam plaats heeft, dat de thermometer onmogelijk alleen daardoor zoo schielijk zoude kunnen stijgen, als bij deze proef het geval is.

Fig. 163



Dompelt men den bol in eene zeer koude vloeistof, dan daalt de thermometer. Deze proef zoude doen denken aan eene voortplanting der koude door straling. Dit is echter het geval niet; de thermometer verliest een gedeelte zijner warmte door uitstraling, omdat de binnenoppervlakte van den luchtledigen bol bij deze proef de lagere temperatuur der koudere vloeistof heeft aangenomen. Eigenlijk moet men zich de zaak zoo voorstellen, dat van elk ligchaam warmte uitstraalt. De koudere ligchamen ontvangen dan meer dan zij verliezen, en worden dus warmer; de warmere daarentegen verliezen meer dan zij ontvangen, en bekoelen dus.

159. **Wetten van de warmtestraling.** — Overeenkomst tusschen deze wijze van voortplanting van warmte en de voortplanting van het licht

(*) Wij mogen hier de opmerking niet terughouden, dat men den bol niet als volmaakt luchtledig kan beschouwen, daar er zich waarschijnlijk kwikdampen in bevinden. Daar echter uit de proef blijkt, dat de uitstraling in deze *nagenoeg* luchtledige ruimte evenzoo plaats heeft, als wanneer er lucht in was, zoo mag men wel onderstellen, dat zij in een *volkomen* luchtledig evenzoo zoude geschieden.

is oorzaak, dat men spreekt van warmtestralen, even als men van lichtstralen spreekt. Men moet daarbij echter niet uit het oog verliezen, dat ook een warmtestraal onstoffelijk is. Het is eigenlijk slechts de rigting, waarin zich de warmte voortplant; dat deze steeds de regtlijnige is, blijkt duidelijk, wanneer men tusschen een gloeijend of warm ligchaam en een thermometer eenige schermen met openingen plaatst. Alleen dan, wanneer die openingen zich alle in eene regte lijn bevinden, zal men aan den thermometer verhooging van temperatuur waarnemen.

Behalve deze wet, zijn er nog eenige andere zeer eenvoudige, waaraan de straling der warmte onderworpen is. Vooreerst is de stralende warmte evenredig aan de temperatuur van het ligchaam, van welke de warmtestralen uitgaan. In de tweede plaats is zij omgekeerd evenredig aan de vierkanten der afstanden. Deze wet is een noodzakelijk gevolg van hare eigenschap, om zich in alle rigtingen voort te planten. Dezelfde hoeveelheid warmte zal zich dan op een tweemaal grooteren afstand over een viermaal grootere oppervlakte moeten verspreiden, daar de oppervlakte van bollen tot elkander in reden zijn als de vierkanten der stralen. (Vergelijk het hiervoren (125) gezegde over de vermindering in sterkte bij het geluid.)

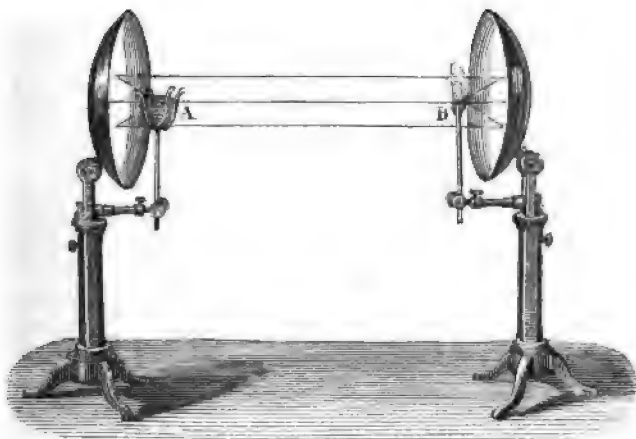
De snelheid, waarmede de warmte zich door de ruimte voortplant, heeft men nog niet onmiddelijk kunnen bepalen. De overeenkomst tusschen de wetten bij de straling der warmte met die van het licht zou doen vermoeden, dat beide zich met gelijke snelheid voortplanten. Wrede (1841) meent echter, dat de voortplantingssnelheid van de warmte slechts $\frac{4}{5}$ van die van het licht bedraagt. Daar dit laatste, zoo als wij later zien zullen, ongeveer 300000 kilometers in de seconde aflegt, zoude de snelheid van de warmte ongeveer 240000 kilometers bedragen.

160. **Wet van Newton over de bekoeling; bewegelijk evenwigt van temperatuur.** — Uit het voorgaande heeft men reeds kunnen afleiden, dat de verwarming of afkoeling door uitstraling afhankelijk is, zoowel van de temperatuur der ligchamen zelven, als van die der middenstof, waardoor zij omringd zijn. Newton had hiervoor als wet opgegeven, dat de snelheid van bekoeling of van verwarming, dat is de vermindering of verhooging van temperatuur gedurende eene zeer korte tijdseenheid, evenredig is aan het verschil tusschen de temperatuur van het ligchaam en die van de omringende middenstof. Latere onderzoekingen van Dulong en Petit (1818) hebben echter doen zien, dat deze wet alleen dan juist is, wanneer het verschil in temperatuur niet grooter is dan 20°, terwijl de hoogste der beide temperaturen 40° niet te boven gaat.

Uit deze wet volgt, dat de temperatuur van een ligchaam, dat aan de uitstraling van eene standvastige warmtebron is blootgesteld, niet onbepaald kan toenemen. De hoeveelheid warmte toch, die het van het warmere ligchaam ontvangt, is, indien dat ligchaam even warm blijft, even groot voor de achtervolgende gelijke tijden; naar mate het echter warmer wordt, straalt het zelf meer uit, en er zal dus een oogenblik komen, waarop de opgenomen en de verloren warmte gelijk zijn, en de temperatuur dus dezelfde blijft. Men kan zich hiervan overtuigen door middel van den hierboven beschreven differentiaal-thermometer; stelt men dien aan de uitstraling van de eene of andere warmtebron bloot, dan zal men het vochtkolommetje aanvankelijk zich zien verplaatsen, doch weldra niet meer van plaats zien veranderen, ten bewijze dat de temperatuur niet meer toeneemt. De hier ontwikkelde hypothese aangaande de uitstraling der warmte, dat deze namelijk uitgaat van alle ligchamen, zoowel van de koudere als van de warmere, is bekend onder den naam van het *bewegelijk evenwigt van temperatuur;* men is ze verschuldigd aan Prevost, die ze in 1790 het eerst bekend maakte.

161. **Terugkaatsing der warmte.** — Wanneer de warmtestralen de oppervlakte van een ligchaam ontmoeten, dan verdeelen zij zich in twee

Fig. 164.



deelen; een gedeelte dringt in het ligchaam, terwijl een ander gedeelte aan de oppervlakte wordt teruggekaatst. De wetten van de terugkaatsing der

warmte zijn dezelfde, als die van de terugkaatsing van veêrkrachtige ligchamen (39) en van het geluid (124). Hier is ook de hoek van terugkaatsing gelijk aan den hoek van invalling, terwijl de invallende en teruggekaatste stralen beide gelegen zijn in een vlak loodregt op de terugkaatsende oppervlakte.

Het gemakkelijkst laten zich deze wetten aantoonen met behulp van dergelijke holle spiegels, als die waarvan wij reeds bij de terugkaatsing van het geluid hebben gebruik gemaakt. In het brandpunt van eenen der in fig. 164 afgebeelde spiegels plaatst men in een daartoe ingerigt ijzeren mandje A gloeijende houtskolen, of een gloeijenden ijzeren kogel; in het brandpunt van den anderen bij B, dien men op eenen afstand van verscheidene ellen geplaatst heeft, doch zoodanig dat de assen van beide in dezelfde regte lijn zamenvallen, een stuk zwam of iets dergelijks. Terwijl men tusschen de beide spiegels slechts weinig van de warmte van het bij A geplaatste vuur bemerkt, is de warmte in B zoo sterk, dat het zwam aanstonds begint te branden. De warmtestralen hebben zich dus hier evenzoo voortgeplant, als wij in fig. 139 voor het geluid hebben afgebeeld. Op grond van deze toepassing geeft men aan de holle spiegels, waarvan bij deze proef is gebruik gemaakt, doorgaans den naam van *brandspiegels*.

Plaatst men bij A een stuk ijs en in B eenen thermometer, terwijl de omringende lucht niet te warm is, dan zal de thermometer dalen. Dit verschijnsel laat zich gemakkelijk verklaren; de thermometer verliest door uitstraling meer warmte dan hij terugkrijgt door de warmtestralen, die uit het brandpunt van den anderen spiegel tot hem komen, en zijne temperatuur wordt dus lager.

Het laat zich gemakkelijk inzien, dat de terugkaatsing evenzeer in het luchtledige plaats moet hebben, als de straling. Men kan zich er van overtuigen door in eene luchtledige glazen klok twee spiegels te plaatsen; in het brandpunt van den eenen bevestigt men een zeer gevoeligen thermometer, en in dat van den anderen brengt men een platinadraad aan het gloeijen door middel van een electrischen stroom, op de wijze, die wij later zullen aanwijzen, als wij de electriciteit behandelen. De thermometer zal ook dan eene hoogere temperatuur aanwijzen tengevolge van de vereeniging van de door beide spiegels teruggekaatste warmtestralen, die weder zamenkomen in het punt, waar zich de bol van den thermometer bevindt.

162. **Uitstralend vermogen.** — De snelheid, waarmede de uitstraling der warmte plaats heeft, is niet alleen volgens de wet van Newton afhankelijk van het verschil tusschen de temperatuur van het ligchaam en die

der omringende lucht of middenstof, maar ook van den aard van zijne oppervlakte. Men kan zulks het eenvoudigst aantoonen door de volgende proef, het eerst door Leslie (1804) genomen. Men neemt een hollen kubus, wiens wanden met verschillende stoffen bedekt zijn; men vult hem met kokend water, en plaatst hem op eenen niet al te grooten afstand van een brandspiegel, doch zoodanig dat de warmtestralen, van dezen kubus uitgaande, door de oppervlakte van den spiegel teruggekaatst worden en zich in het brandpunt vereenigen; een zeer gevoelige differentiaal-thermometer wordt zoodanig geplaatst, dat een zijner bollen zich in dat brandpunt bevindt, terwijl men, door er een scherm tusschen te plaatsen, zorg draagt, dat de andere bol geene warmte door uitstraling van den kubus ontvangt. Men zal bevinden, dat de aanwijzingen van den thermometer verschillen, naar gelang van den aard der oppervlakte van den kubus, door welke de warmte uitgestraald en door den brandspiegel versterkt in het brandpunt teruggekaatst wordt. Door deze proeven vond Leslie, dat, als het uitstralend vermogen van lampenzwart of rookzwart door 100 wordt uitgedrukt, dat van papier 98, van glas 90, van Oostindische inkt 88, van menie 80, van lood (dof) 45, van tin, koper, zilver of goud slechts 12 bedroeg.

Men kan de proeven aangaande het uitstralend vermogen nog naauwkeuriger doen, door den kubus in de plaats van het lampje B bij den thermo-multiplicateur van Melloni (Fig. 162) te plaatsen, en dan de afwijkingen van de magneetnaald *a* na te gaan, wanneer men verschillende oppervlakten naar de thermo-electrische kolom P gekeerd houdt. Met dezen toestel heeft men gevonden voor het uitstralend vermogen van

rookzwart.	100,	Oostindische inkt	85,
loodwit	100,	gomlak.	72.
vischlijm.	91,		

De proeven hebben voorts aangetoond, dat het uitstralend vermogen alleen afhangt van de buitenste oppervlakte, want men vindt dezelfde getallen, onverschillig van welke stof de wanden van den kubus vervaardigd zijn, mits zij slechts met eene dnnne laag van de aangeduide stoffen overdekt zijn.

De voor het uitstralend vermogen der metalen door Leslie gevondene getallen schijnen te hoog te zijn; althans uit latere onderzoekingen, met den toestel van Melloni in het werk gesteld, is gebleken, dat het voor zilver ongeveer 3, voor goud 4 en voor koper 5 bedraagt.

Het is echter niet alleen van den aard der oppervlakte, dat het uitstralend vermogen afhankelijk is; het doet hiertoe zeer veel af, of deze meer of minder gepolijst is. Leslie meende, dat het een vaste regel is, dat men door de oppervlakte te krassen het uitstralend vermogen vermeerdert. Naderhand heeft

Melloni echter aangetoond dat, hoewel dit in sommige gevallen plaats heeft, het toch niet als regel mag worden aangenomen. Het bleek hem onder anderen, dat het uitstralend vermogen van eene plaat van geslagen zilver toeneemt, als zij gekrast wordt, terwijl bij gegoten zilver juist het tegenovergestelde plaats heeft.

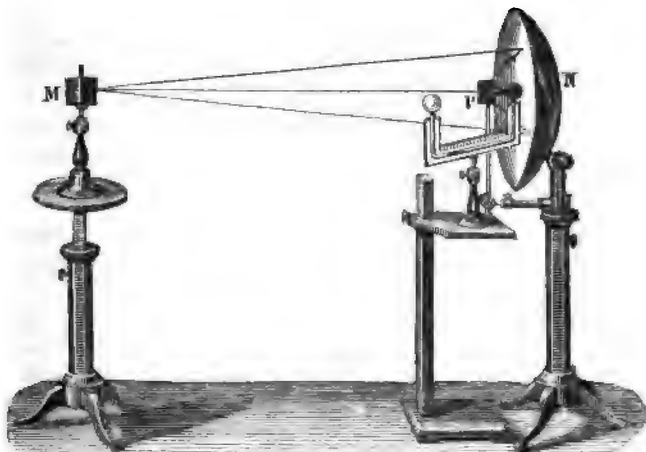
Latere onderzoekingen van Masson (1847) hebben het zeer waarschijnlijk gemaakt, dat het uitstralend vermogen volstrekt niet afhangt van den aard der stof, maar alleen van den aard der oppervlakte. Hij heeft namelijk verschillende stoffen, zooals ivoorzwart, loodwit, kiezel, verschillende koolzure zouten, enz. in de gedaante van een uiterst fijn poeder als scheikundig neêrslag op de oppervlakte van een met kokend water gevuld vat gebragt, en nagenoeg bij alle een gelijk uitstralend vermogen gevonden. Bij sommige vond hij een gering verschil, hetgeen echter alleen daaraan scheen te moeten worden toegeschreven, dat het poeder niet fijn genoeg was, en de oppervlakte daardoor eenigen glans behield.

Het uitstralend vermogen van gassoorten is zeer gering. De warmte van de vlam van waterstofgas, hoewel zij eene aanzienlijke temperatuur heeft, is zelfs op een geringen afstand ter naauwernood merkbaar. Plaatst men echter in de vlam een metaaldraad, dan geraakt deze aan het gloeijen en neemt de temperatuur van de vlam aan; men kan zich dan door een differentiaal-thermometer gemakkelijk overtuigen, dat het uitstralend vermogen aanzienlijk is toegenomen. Van zoodanigen spiraalvormig gewondenen platinadraad, die in eene alcoholvlam gloeijend gehouden wordt, bedient men zich ook wel als standvastige warmtebron bij den toestel van Melloni.

163. **Terugkaatsend vermogen.** — Even als de hoeveelheid der uitstralende warmte afhankelijk is van den aard der oppervlakte, zoo is dit ook het geval met de hoeveelheid warmte, die door verschillende oppervlakten wordt teruggekaatst. Om dit te onderzoeken, zoude men een der brandspiegels achtervolgens met verschillende stoffen moeten bedekken; eenvoudiger echter is het zich te bedienen van een toestel, zoo als in fig. 165 is afgebeeld, en waarmede ook Leslie proeven heeft in het werk gesteld. De stralen, van eene standvastige warmtebron M, in onze afbeelding den met warm water gevulden kubus, uitgaande, worden door den spiegel N teruggekaatst naar het brandpunt. Alvorens zij echter daar aankomen, laat men ze vallen op een vlak spiegeltje P, dat ze andermaal terugkaatst naar een punt, even ver vóór het spiegeltje gelegen, als het brandpunt van N zich er achter bevindt. In dat punt wordt de eene bol van een differentiaal-thermometer geplaatst. Door het spiegeltje P achtervolgens door andere te vervangen kan men het terugkaatsend vermogen van verschillende

stoffen onderzoeken. De toestel van Melloni (Fig. 162) kan ook voor zoodanige onderzoekingen ingerigt worden, door het liniaal, waarop de ver-

Fig. 165.



schillende standaards bevestigd zijn, bij F om een scharnier te doen draaijen, en op het tafeltje E, dat men dan onmiddelijk bij dat punt bevestigt, een spiegeltje te plaatsen. Men zal dan den toestel P gemakkelijk zoo kunnen plaatsen, dat de door het spiegeltje teruggekaatste warmtestralen juist op den kant *m* invallen. Men moet evenwel zorg dragen, des noods door nog een scherm er tusschen te plaatsen, dat er geene stralen van de warmtebron regtstreeks bij *m* komen. Door deze inrigting heeft men zelfs het voordeel, dat de totale weg, doorloopen door de warmtestralen van de bron af tot aan de thermo-electrische kolom P, in beide gevallen even groot is, en dat men dus de hoeveelheid teruggekaatste warmte zonder nadere herleiding kan vergelijken met die, welke door onmiddellijke uitstraling zoude zijn medegedeeld. Door aftrekking vindt men dan terstond, hoeveel bij de terugkaatsing is verloren gegaan.

De uitkomst van deze onderzoekingen is geweest, dat in de eerste plaats de aard der stof, waaruit de terugkaatsende oppervlakte bestaat, eenen grooten invloed uitoefent op de hoeveelheid teruggekaatste warmte. Stelt men die, welke door gepolijst geel koper wordt teruggeworpen, voor door 100, dan vindt men voor zilver 90, staal 70, lood 60, glas 10, rookzwart 0. De laatstgenoemde stof kaatst dus volstrekt geene warmte terug. Het is bovendien opmerkelijk, dat

die stoffen, welke het grootste uitstralend vermogen hebben, de meeste warmte terugkaatsen. Uit eene vergelijking van de hoeveelheid warmte, die op de terugkaatsende oppervlakte invalt, met die, welke teruggekaatst wordt, blijkt, volgens onderzoekingen van de la Provostaye en Desains, dat, als de hoek van invalling 50° bedraagt, door zilver 0,97, door goud 0,95, door koper 0,93, door platina 0,83, door staal 0,82, en door ijzer 0,77 der totale warmte wordt teruggekaatst, wel te verstaan, wanneer deze metalen goed gepolijst zijn. Bij metalen oefent de hoek van invalling slechts geringen invloed uit; bij glas is dit echter niet het geval; daar neemt het terugkaatsend vermogen sterk toe, als de hoek van invalling grooter wordt.

164. **Diffusie der warmte.** — Bij de voorgaande proeven over de terugkaatsing der warmte hebben wij als voorwaarde gesteld, dat de oppervlakte goed gepolijst moet wezen. Is dit niet het geval, dan is het terugkaatsend vermogen veel geringer. Men neemt dan tevens het verschijnsel waar, dat doorgaans *diffusie* of verstrooijing van de warmtestralen genoemd wordt. Door de ongelijkheid der oppervlakte worden namelijk de warmtestralen niet alle volgens dezelfde rigting teruggekaatst, maar naar alle rigtingen, zoodat slechts een zeer gering gedeelte voortgeplant wordt in die rigting, volgens welke de terugkaatsing op eene gepolijste oppervlakte zoude plaats hebben. Men kan zich hiervan overtuigen, door in eene donkere kamer door eene opening zonnestralen te laten vallen tegen eenen muur met ruwe oppervlakte. Plaatst men in die kamer den toestel van Melloni, dan zal men daarmede zich kunnen overtuigen, dat van de verlichte en verwarmde plek op den wand in alle rigtingen evenveel warmte wordt uitgestraald.

165. **Absorptie-vermogen.** — Reeds meermalen hebben wij opmerkzaam gemaakt, dat de ligchamen de eigenschap bezitten om warmtestralen op te nemen; het is alleen door deze eigenschap, dat in de meeste der op de vorige bladzijden vermelde proeven de uitstraling eener warmtebron aan eenen thermometer kon worden waargenomen. Niet bij alle ligchamen is het vermogen om die warmtestralen op te slorpen, of, zooals men doorgaans zegt, te *absorberen*, even groot; ook hierop oefent de aard der oppervlakte eenen zeer grooten invloed uit. Men behoeft slechts eene donker geverwde tafel en een daarop liggend wit papier te betasten, nadat de zon er eenigen tijd op geschenen heeft, om zich te overtuigen, dat de zwarte oppervlakte meer warmte geabsorbeerd heeft dan het wit papier. Duidelijk blijkt ook dit door de volgende eenvoudige proef. Dunne koperen plaatjes worden aan den eenen kant met was bestreken, en aan den anderen bedekt, het eerste met eene dunne

laag rookzwart, het tweede met loodwit, het derde met gomlak; het vierde wordt bekrast en het vijfde goed gepolijst. Hangt men deze naast elkander voor een vuur, zoodat ze alle aan eene gelijke hitte zijn blootgesteld, en dat de met was bestrekene kant van het vuur afgekeerd is, dan zal de was het eerst smelten aan het eerste plaatje en vervolgens langs de rij af, ten bewijze dat door het eene meer warmte wordt opgenomen dan door het andere.

Wil men echter de hoeveelheden geabsorbeerde warmte meten, dan moet men zich weder bedienen van den toestel van Melloni. Het best geschiedt dit, door voor de thermo-electrische kolom koperen plaatjes te plaatsen, waarvan de naar de kolom toegekeerde oppervlakte zwart gemaakt is, terwijl de andere kant bedekt is met de stof, die men wil onderzoeken. Op die wijze vindt men, het absorptie vermogen van rookzwart 100 stellende, voor loodwit eveneens 100, voor vischlijm 91, Oostindische inkt 85, gomlak 72, en voor de metalen gemiddeld 13. Van het sterke opslorpend vermogen van rookzwart en Oostindische inkt trekt men partij, om, door een der bollen van den differentiaal-thermometer zwart te maken, de gevoeligheid van dit werktuig aanzienlijk te vermeerderen.

Melloni heeft ook verschillende weefsels onderzocht en bevonden, dat, als alle dezelfde kleur hebben, zijde de meeste warmte opneemt, daarna wol, katoen, linnen (vlas), en eindelijk hennep.

Bij de zeer goed gepolijste oppervlakten kan men de hoeveelheid geabsorbeerde warmte vinden, door van de geheele hoeveelheid warmte die af te trekken, welke wordt teruggekaatst, wanneer men zich namelijk overtuigd heeft, dat het ligchaam geene warmte doorlaat; heeft er echter diffusie plaats, zoodat de teruggekaatste niet naauwkeurig kan bepaald worden, dan kan deze methode geene zekere resultaten opleveren. De meerdere of mindere gladheid schijnt weinig invloed uit te oefenen op het absorptie-vermogen; het verschil, dat men bij sommige oppervlakten, die in dat geval verkeeren, waarneemt, schijnt eer te moeten worden toegeschreven aan het verschil in digtheid der aan de oppervlakte liggende moleculen, dat het gevolg is van het krassen of hameren, waardoor de glans vermindert. Het absorptie-vermogen hangt veel af van de rigting der invallende warmtestralen. Vallen zij loodregt op de oppervlakte, dan is de absorptie het sterkst; naarmate zij schuiner invallen vermindert zij. Het moet hieraan worden toegeschreven, dat de grond des winters minder door de zonnestralen verwarmd wordt dan des zomers.

166. **Gelijkheid van het uitstralend vermogen en het absorptie-vermogen van dezelfde stof.** — Vergelijkt men de getallen

die wij hierboven (162) opgegeven hebben voor het uitstralend vermogen van rookzwart, loodwit, vischlijm, Oostindische inkt en gomlak met die, welke zijn aangewezen voor het absorptie-vermogen dier zelfde stoffen (165), dan bemerkt men terstond, dat zij volkomen overeenstemmen. Dit leidt ons reeds tot de onderstelling, dat beide vermogens gelijk zijn; zulks is bovendien in overeenstemming met de opmerking, dat een ligchaam in eene beslotene ruimte weldra dezelfde temperatuur aanneemt als die ruimte zelve, hetgeen alleen dan kan plaats hebben, als het verlies door uitstraling en de winst door absorptie even groot zijn. Ten overvloede is deze gelijkheid nog bevestigd door eene proef, door Dulong en Petit (1818) genomen, en die men zonder veel moeite kan herhalen. Binnen in een koperen of glazen bol, wiens binnenwand zwart was gemaakt, plaatsten zij een thermometer zoodanig, dat zijn zwartgemaakte of met eene andere stof bestrekene bol in het middenpunt kwam, doch zijne schaal daarbuiten. De holle bol werd in een waterbad geplaatst van 10°; de thermometer werd tot 0° gebragt, en zoodra hij zich in den bol bevond, werd uit dezen de lucht verwijderd; toen de thermometer eene temperatuur van 5° had aangenomen, werd de tijd waargenomen, die noodig was om hem tot 6° te brengen. Vervolgens bragt men de temperatuur van het waterbad op 0° en die van den thermometer op 10°, en nam den tijd waar, die verloopen moest om dezen van 5° tot 4° te doen dalen. In het eerste geval had er absorptie, in het tweede uitstraling bij den thermometerbol plaats; en daar in beide gevallen een gelijke tijd vereischt werd voor eene even groote verandering van de temperatuur, zoo volgde hieruit dat beide, het uitstralend vermogen en het absorptie-vermogen van den thermometerbol, even groot zijn.

167. **Toepassingen.** — In eene menigte gevallen in het dagelijksch leven vindt men de toepassing en de bevestiging van hetgeen is medegedeeld omtrent de absorptie en uitstraling der warmte. Wanneer het veld met sneeuw bedekt is, wordt de grond voor zware koude beveiligd, omdat het uitstralend vermogen van sneeuw slechts gering is. Onder de werking der zonnestralen smelt de sneeuw slechts langzaam wegens haar gering absorptie-vermogen; op daken of hellingen, die naar de zon gekeerd zijn, evenwel schielijker dan op de vlakte, hetgeen alleen moet worden toegeschreven aan de rigting, volgens welke de zonnestralen invallen. Strooit men koolasch op de sneeuw, of legt men er een donker gekleurd voorwerp op, dan smelt zij daaronder veel schielijker; hetzelfde heeft plaats als zij in de straten vuil is geworden; in beide gevallen is het absorptie-vermogen vermeerderd. Zwarte doffe kagchels stralen meer warmte uit dan blinkende metalen en zoogenaamde porseleinen kagchels. De thee blijft langer warm in een blinkenden metalen trekpot, dan in een

doffen porseleinen. Schuttingen, waartegen vruchtboomen geleid worden, worden donker geverwd of met koolteer bestreken, ten einde het absorptie-vermogen te vermeerderen; zij worden dus warmer, en kunnen door uitstraling ook meer warmte aan de vruchten afgeven. Zwarte kleederen zijn warmer dan lichtgekleurde, wanneer men aan de werking der zonnestralen is blootgesteld, omdat de eerste veel meer warmte opnemen. Daarentegen is de uitstraling ook weer aanzienlijker, zoodat ook in den winter lichtgekleurde te verkiezen zijn. De negers nemen door hunnen zwarten huid veel meer warmte op, maar om dezelfde reden stralen zij ook meer uit. Het absorptie-vermogen wordt echter aanzienlijk verminderd door de vetachtige geaardheid van hunne huid, waardoor een aanzienlijk gedeelte der warmtestralen teruggekaatst wordt. In noordelijke streken treft men vele dieren aan met wit vel; men zal in verband met het voorgaande gemakkelijk inzien, dat zij daardoor eene lage temperatuur kunnen doorstaan, waarin dieren met donkere huid niet zouden kunnen leven.

168. **Doorlating van warmtestralen.** — Dat sommige ligchamen de eigenschap hebben van warmtestralen door te laten, blijkt onmiddelijk uit de aan ieder bekende proef met een brandglas, waarmede men de zonnestralen in één punt doet zamenkomen, ten einde ligt brandbare stoffen in brand te steken. Liet het glas de warmte niet door, dan zoude het onmogelijk zijn op die wijze eene vermeerdering van hitte te verkrijgen. Melloni (1832) heeft met behulp van zijn boven beschreven toestel talrijke onderzoekingen in het werk gesteld, ook voor die soort van warmtestralen, welke niet van licht vergezeld zijn. De ligchamen die warmte doorlaten worden *diathermaan* genoemd; die, welke deze eigenschap niet bezitten, heeten *adiathermaan* (1).

Onder de eerstgenoemde moeten in de eerste plaats alle gassoorten gerekend worden; de lucht bijv. laat de warmtestralen in groote hoeveelheid door; anders zouden de hoogere luchtlagen niet eene zoo lage temperatuur hebben, in weerwil dat de stralen der zon steeds er door heen gaan. Onder de vaste ligchamen zijn er echter ook, die nagenoeg alle warmtestralen doorlaten, zonder zelven merkbaar in temperatuur toe te nemen. Andere daarentegen, zooals de metalen, laten volstrekt geene warmte door. Wel zal eene metalen plaat, waarvan de eene kant naar een sterk vuur gekeerd is, aan den tegenovergestelden kant warmte afgeven; doch dit verschijnsel is niets anders dan het gevolg van de absorptie en uitstraling der warmte. Wat de vloeistoffen aan-

(1) Sommigen noemen de stoffen, die de warmte niet doorlaten, *athermaan*; etymologisch beschouwd, komt mij echter de uitdrukking *adiathermaan* verkieslijk voor.

gaat, bij de meeste wordt ook slechts weinig warmte doorgelaten. Eene laag olijfolie van ongeveer een duim dikte laat 0.3, eene even dikke laag water slechts 0.1 van de invallende warmte door.

Melloni gebruikte bij zijne proeven vier verschillende warmtebronnen. De eerste was eene lamp met enkele pit en enkelen luchtstroom, zoo als ze in fig. 162 is afgebeeld; doorgaans wordt zij naar den maker Locatelli-lamp genoemd; de tweede was een spiraalvormig gewonden platinadraad, die in eene spiritusvlam wit gloeijend gehouden werd; de derde een zwartgemaakt koperblik, dat door eene daarachter geplaatste spirituslamp op eene temperatuur van 400° gehouden werd; het vierde een zwartgemaakte kubus van koperblik, waarin water op eene temperatuur van 100° werd gehouden. De ligchamen, wier doorlatings-vermogen onderzocht werd, werden op het tafeltje E geplaatst, juist zoo als in fig. 162 is voorgesteld, en daarna de afwijking van de naald van den multiplicateur waargenomen, zoowel als de warmtestralen regtstreeks tot de thermo-electrische kolom P kwamen, als wanneer zij eerst door het op het tafeltje geplaatste ligchaam moesten gaan. De uitkomsten zijner waarnemingen, welke men met een goeden toestel gemakkelijk kan herhalen, zijn hoofdzakelijk zamengevat in de volgende tabel.

ONDERZOCHTE STOFFEN.	Dikte der plaat in strepen.	HOEVEELHEID DOORGELATEN WARMTE, ALS WARMTEBRON GEBRUIKENDE			
		eene Locatelli-lamp.	een gloeijenden platinadraad.	zwart koperblik op 400° C.	zwart koperblik op 100° C.
Vrije uitstraling	—	100	100	100	100
Steenzout (doorschijnend).	2,6	92	92	92	92
Steenzout (niet doorschijnend)	„	65	65	65	65
Kalkspath	„	39	28	6	0
Spiegelglas	„	39	24	6	0
Bergkristal	„	38	28	6	0
Gips	„	14	5	0	0
Aluin	„	9	2	0	0
Zwart glas	1,0	26	25	12	0
IJs.	2,6	6	0	0	0

Hieruit blijkt, dat steenzout de eenige van de onderzochte stoffen is, welke de eigenschap heeft van nagenoeg alle warmtestralen door te laten onver-

schillig van welke warmtebron zij afkomstig zijn, en dat die doorlating des te volkomener is, naarmate het steenzout zuiverder is. Het verlies van slechts 8 ten honderd moet volgens Melloni niet worden toegeschreven aan absorptie, maar alleen aan terugkaatsing van een gedeelte der warmtestralen aan de oppervlakte. Dit blijkt daaruit, dat de dikte van het steenzout geen invloed uitoefent op de hoeveelheid teruggehoudene warmte; een stuk van 4 duimen dikte laat evenveel warmtestralen door, als een plaatje van slechts ééne streep, hetgeen het geval niet zoude kunnen weten, indien er absorptie van warmte plaats had. Steenzout is dus volgens Melloni eene volkomen diathermane stof voor alle soorten van warmtestralen (1).

Bij de andere opgenoemde stoffen is dit blijkbaar niet het geval. Vooreerst is het uit de getallen in de tabel duidelijk, dat het doorlatingsvermogen van de daar opgenoemde stoffen zeer verschillend is, en in de tweede plaats, dat doorschijnendheid niet altijd verbonden is met geschiktheid om warmtestralen door te laten; zwart glas bijv., dat geen of slechts zeer weinig licht doorlaat, laat meer warmtestralen door, dan gips, aluin of ijs, die alle meer of min doorschijnend zijn.

169. **Verschillende soorten van warmtestralen. Thermochrose.** — Behalve het hierboven vermelde kunnen wij uit de tabel op bladz. 244 nog een ander belangrijk resultaat afleiden. De warmtestralen namelijk, die van de hier opgenoemde onderscheidene warmtebronnen uitgaan, moeten ongelijksoortig zijn, daar de verhouding tusschen de doorgelatene en de van de warmtebron uitstralende warmte voor eene zelfde stof zeer verschillend zijn kan, en voor alle, behalve het steenzout, de doorlating geringer is, wanneer de temperatuur van de warmtebron lager wordt. Nog meer valt het onderscheid tusschen de warmtestralen in het oog, wanneer men dezelfde stralen achtervolgens door verschillende stoffen laat gaan. Laat men bijv. de warmtestralen van eene lamp eerst vallen op een aluinplaatje, en de door dit doorgelatene op gips, dan laat dit 59 van de 100 deelen door, terwijl er van de onmiddellijk van de lamp komende warmte slechts 14 van de 100 worden doorgelaten; plaatst men achter de warmtebron een zwart glas, dan laat een aluinplaatje slechts 0,003 van de warmte door, die reeds door het glas gegaan is, terwijl het van de warmte, die van de lamp komt, blijkens de tabel 0,09 doorlaat. Melloni en anderen hebben deze eigenschappen zorgvuldig on-

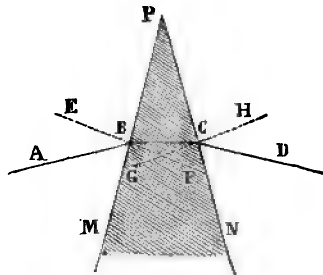
(1) Deze eigenschap is door de la Provostaye en Desains (1853) in twijfel getrokken; volgens hunne onderzoekingen zouden van de 100 warmtestralen 83,5 doorgelaten, 10,5 geabsorbeerd en door de achterste oppervlakte zelfstandig uitgestraald worden, terwijl er 6 worden teruggekaatst.

derzocht, en zijn tot het besluit gekomen, dat de warmtestralen doorgaans uit verschillende soorten zijn zamengesteld, waarvan de een gemakkelijker door deze, de andere beter door gene stof wordt doorgelaten. Iets dergelijks zullen wij later bij het licht leeren kennen; een zonnestraal wordt, na door een rood glas gegaan te zijn, door een of meer andere roode glazen onveranderd doorgelaten. Laat men hem echter daarna door een groen glas gaan, dan wordt hij geheel geabsorbeerd. Aan de hier vermelde eigenschap der warmtestralen, volgens welke zij in meerdere of mindere mate door eene zelfde diathermane stof doorgelaten worden, heeft Melloni den naam van *thermochrose* gegeven. De thermochrose is dus voor de warmtestralen nagenoeg hetzelfde als kleur voor de lichtstralen. Steenzout is dus de eenige stof, die warmtestralen van verschillende thermochrose gelijkelijk doorlaat, evenals doorschijnend en kleurloos glas alle lichtstralen onveranderd doorlaat; de overige diathermane stoffen, zooals kalkspath, bergkristal, aluin, laten de warmtestralen van verschillende thermochrose niet in dezelfde verhouding door, evenals gekleurde glazen verschillend gekleurd licht niet op dezelfde wijze doorlaten.

Uit onderzoekingen van Knoblauch (1854) is gebleken, dat een dun goudblaadje ook warmtestralen doorlaat, maar dat deze daardoor tevens ontleed worden, zoodat die, welke door het blaadje gegaan zijn, zich ten opzigte van sommige ligchamen anders verhouden, dan de onmiddellijk uitgestraalde.

170. **Breking der warmtestralen; brandglas.** — Bij de bovenvermelde proeven over de doorlating der warmte zijn wij steeds uitgegaan van de onderstelling, dat de stralen loodregt op de oppervlakte invielen, en dat het ligchaam, hetwelk ze doorliet, een plaatje was met evenwijdige wanden. De rigting, waarin zich de stralen voortplantten, was dan ook steeds eene regtlijnige. Dit zal echter niet langer het geval zijn, wanneer de stralen niet loodregt invallen op het diathermane ligchaam; zij veranderen dan van rigting en worden *gebroken*. Bij lichtstralen heeft, zooals wij later zullen zien, hetzelfde plaats. Wij zullen bij die gelegenheid de wetten der *breking* meer algemeen beschouwen, en bepalen ons thans tot eene korte verklaring, voor zoover de warmtestralen aangaat. Zij MPN (Fig. 166) de doorsnede van een prisma, waarvan MP en NP twee vlakken voorstellen. Wanneer van breking van licht- of warm-

Fig. 166.



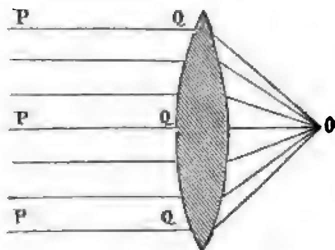
testralen sprake is, bedoelt men door prisma niet zoozeer datgene, wat men in de meetkunde een prisma noemt, maar eenvoudig eene middenstof, door twee niet evenwijdige vlakken begrensd. Een straal AB, in eene schuine rigting op het vlak MP invallende, gaat daar binnen niet in dezelfde rigting voort, maar volgt eene rigting BC, welke met de normaal EF eenen hoek FBC maakt, kleiner dan de hoek van invalling ABE, althans wanneer de overgang van eene dunnere in eene digtere middenstof plaats heeft. Den hoek FBC noemt men den *brekingshoek.* Treedt de straal BC bij C uit het prisma, dan verandert de rigting weder; daar hij nu echter in eene dunnere middenstof overgaat, zal de brekingshoek HCD grooter zijn dan de hoek van invalling BCG. De straal, in de rigting AB in het prisma tredende, zal er dus volgens CD weder uitkomen.

Bij lichtstralen kan men zich zeer gemakkelijk hiervan overtuigen, door in eene donkere kamer een zonnestraal op een glazen prisma te laten vallen. De rigting, welke deze volgt na door hetzelve gegaan te zijn, laat zich gemakkelijk nagaan. Neemt men echter in plaats van een glazen prisma, er een van eene meer diathermane stof, zooals steenzout, dan zal men zich met behulp van een differentiaal-thermometer kunnen overtuigen, dat de warmtestralen denzelfden weg volgen als de lichtstralen. Melloni heeft bovendien aangetoond, dat ook bij zoogenaamde duistere stralende warmte de warmtestralen gebroken worden. Men kan dit gemakkelijk aantoonen met den thermo-multiplicateur (Fig. 162). Op het tafeltje E plaatst men een prisma van steenzout; gebruikt men dan als warmtebron den boven beschrevenen kubus met water van 100°, dan zal men bevinden, dat er alleen wanneer de thermo-electrische kolom geplaatst wordt in de rigting, welke volgens het bovenstaande de warmtestralen moeten volgen, eene afwijking van de naald wordt waargenomen, terwijl deze niet afwijkt, wanneer de kolom zich op hare gewone plaats in het verlengde van de invallende warmtestralen bevindt.

Wij zullen bij de behandeling van het licht ook de verschijnselen leeren kennen, welke dit vertoont, wanneer het gebroken wordt door eene lens, dat is, door eene middenstof, die door twee bolvormige oppervlakken begrensd is. Wij zullen dan zien, dat lichtstralen volgens de evenwijdige rigtingen PQ (Fig. 167) op eene glazen lens invallende, aan de andere zijde in een punt O zamenkomen, alwaar zij eene versterking van licht veroorzaken. Volgens het bovenstaande zal dus in dat punt ook eene aanzienlijke vermeerdering van warmte moeten plaats hebben. Door het gewone brandglas wordt dit bevestigd. Een ligt brandbaar voorwerp in O vat terstond vuur, als de warmtestralen zonnestralen zijn. Heeft men eene lens van klipzout in plaats van

eene glazen lens, dan zal de warmte in O nog aanzienlijker zijn, omdat de middenstof meer diathermaan is.

Fig. 167.



Op grond van deze eigenschappen draagt het punt O den naam van *brandpunt.*

Nog eenige andere eigenschappen der warmtestralen, die met de breking in verband staan, zullen wij later vermelden, wanneer wij de daarmede overeenkomende verschijnselen der lichtstralen behandelen.

C. VOORTPLANTING VAN WARMTE DOOR GELEIDING.

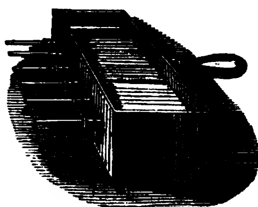
171. **Geleiding der warmte in het algemeen.** — Houdt men eene ijzeren stang, waarvan het eene uiteinde in het vuur ligt, aan het andere uiteinde vast, dan duurt het niet lang of men gevoelt, dat zij warm wordt; deze warmte neemt weldra zoozeer toe, dat men ze niet langer zonder zich te branden in de hand kan houden. Is daarentegen de stang met een houten handvat voorzien, zoo wordt dit ook wel warm, doch in zoo geringe mate, dat men het zelfs nog in de hand kan houden, als de stang gloeijend is; zelfs zal men dat houten handvat nog kunnen vasthouden als het door de hitte van de stang aan het andere uiteinde reeds begint te branden. Deze aan ieder bij ondervinding bekende daadzaak leidt tot het besluit, dat de warmte in het ijzer zich van molecule tot molecule voortplant, en dat zij zulks bij het hout ook wel doet, doch in veel geringere mate. Hieruit volgt dus, dat de ligchamen de warmte geleiden, maar dat zij dit niet alle evenzeer doen, of, zooals men het gewoonlijk uitdrukt, dat het geleidend vermogen voor warmte bij verschillende stoffen zeer verschillend is; men onderscheidt ze daarom in *goede* en *slechte warmtegeleiders.* Dat de voortplanting der warmte door geleiding veel langzamer geschiedt dan door uitstraling, blijkt daaruit, dat men bij de boven beschrevene eenvoudige proef de stralende warmte van het vuur terstond aan de hand gevoelt, terwijl er een geruime tijd verloopt, alvorens men de door de stang voortgeplante warmte bemerkt.

Hoewel het moeijelijk is te bepalen, hoe de voortplanting der warmte binnen in de ligchamen plaats heeft, zoo schijnt het toch, dat men zich moet

voorstellen, dat er eene uitstraling van het eene molecule tot het andere plaats heeft; hoe digter deze moleculen dus bij elkander gelegen zijn, des te beter moet de geleiding zijn, en des te schielijker moet zich dus de warmte in het ligchaam voortplanten.

172. **Geleidend vermogen van vaste ligchamen.** — Het eenvoudigst kan men zich van het verschil in geleidend vermogen bij onderscheidene stoffen overtuigen, en die zelfs met elkander vergelijken, met behulp van den in fig. 168 afgebeelden en het eerst door Ingenhousz (1784) gebruikten toestel. Deze bestaat uit een metalen bak, in een van welks zijwanden zich een zeker aantal even dikke cilindrische staafjes van onderscheidene metalen, glas, houtsoorten, enz. bevinden; men kan deze het best in den wand bevestigen, door ze in kurkjes te steken en deze weder in de openingen van den wand te bevestigen. De staafjes worden met eene dunne laag was bedekt, door ze koud in gesmoltene was te dompelen. Giet men nu warme olie in den bak, dan zal de warmte zich aan de wanden en ook aan de staafjes mededeelen, en zich langs deze des te schielijker voortplanten, naarmate zij betere geleiders der warmte zijn. Daar was reeds bij eene temperatuur van ongeveer 60° smelt, en men zorg kan dragen, dat de olie in den bak een veel hoogeren warmtegraad heeft, zoo zal de was bij alle smelten, doch bij het eene staafje veel vroeger dan bij het andere; zijn de staafjes niet al te kort, dan zullen er onder zijn, op welke de was zelfs na langen tijd niet tot aan het uiteinde smelt.

Fig. 168.

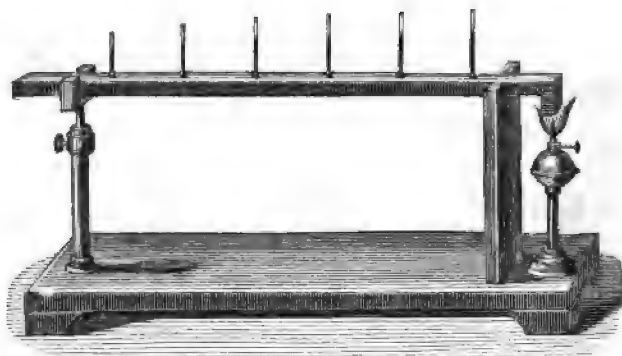


Door dit en andere middelen heeft men gevonden, dat over het algemeen de stoffen, die de grootste digtheid hebben, de beste warmtegeleiders zijn. De metalen moeten dus in de eerste plaats genoemd worden, en onder deze geleiden ook weder de digtste en minst smeltbare doorgaans het best de warmte; bij sommige schijnen echter ook andere omstandigheden eenen bepaalden invloed uit te oefenen. De betrekking tusschen het geleidend vermogen en de digtheid laat zich in verband met het hierboven opgemerkte gemakkelijk verklaren; hoe digter toch een ligchaam is, des te meer moleculen zijn er in eene bepaalde ruimte bevat, en des te beter zal de voortplanting van het eene molecule op het andere kunnen geschieden.

De onderzoekingen omtrent het geleidend vermogen van verschillende metalen zijn het eerst door Biot en later door Despretz (1838) in het werk gesteld met den in fig. 169 afgebeelden toestel, die slechts bestaat uit eene

staaf, welke aan haar eene uiteinde verwarmd wordt, terwijl in kleine met kwikzilver gevulde gaatjes, die op eenen onderlingen afstand van eene palm in de staaf gemaakt zijn, thermometers zijn geplaatst. Uit den stand van deze thermometers na een tijd van 5 of 6 uren, wanneer zij niet meer ver-

Fig. 169.



anderden, heeft Despretz de wet afgeleid, dat, wanneer de afstanden van de warmtebron toenemen als de termen van eene rekenkundige reeks, de verschillen van de temperatuur der staaf in die punten met die van de omringende lucht afnemen als de termen eener meetkundige reeks. Bij slecht geleidende stoffen was echter de afwijking vrij groot; het verliès door uitstraling brengt ook bij om de resultaten minder juist te maken.

Latere onderzoekingen, door Wiedemann (1853 en 1854) met bijzondere zorgvuldigheid in het werk gesteld, hebben wel de bevestiging dezer wet gegeven, maar de volgorde der metalen, wat hunne geleidbaarheid aangaat, is volgens hem eene geheel andere dan de door Despretz gegevene. Wij bepalen ons bij de door Wiedemann gevondene resultaten, volgens wien deze de volgorde is:

Zilver	1000	IJzer	119
Koper	736	Staal	116
Goud	532	Lood	85
Zink	190	Platina	84
Tin	145	Bismuth	18.

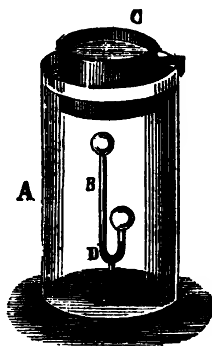
De hier opgegevene getallen drukken het geleidend vermogen vergelijkenderwijze uit. Despretz heeft bovendien voor marmer 24, voor porselein 12 gevonden.

Uit de onderzoekingen van de Sénarmont (1847) is gebleken, dat het geleidend vermogen in kristallen, die niet symmetrisch zijn en waarin de digtheid en veêrkracht niet overal dezelfde zijn, ook niet in alle rigtingen gelijk is. Doorgaans is zij de grootste in de rigting van de as, zooals bij kwarts, kalkspath en andere is waargenomen; bij sommige had echter het tegenovergestelde plaats.

In stoffen, die niet homogeen zijn, maar uit verschillende bestanddeelen bestaan, heeft de voortplanting langzamer plaats. Vooral is dit bij organische stoffen het geval. In houtsoorten is de geleiding in de rigting der vezels aanzienlijker dan in eene rigting loodregt daarop. De schors of de bast van het hout is een zeer slechte warmtegeleider; bij kurk is deze eigenschap vooral merkbaar. Zemelen, stroo, wol, katoen, zijde en dergelijke stoffen, die òf in een fijn verdeelden toestand zijn, òf zoodanig zijn zamengesteld, dat zich talrijke poriën tusschen de moleculen bevinden, behooren eveneens tot de slechte geleiders.

173. Geleidend vermogen van vloeistoffen. — Vloeistoffen geleiden de warmte slechts zeer weinig. Om dit aan te toonen kan men zich bedienen van den toestel in fig. 170 afgebeeld. In een groot bekerglas A, dat met water gevuld is, plaatst men een differentiaal-thermometer B, die zoodanig is ingerigt, dat de eene bol zich veel hooger bevindt dan de andere. Plaatst men nu er boven op, bij C, een met warme olie gevuld bakje, zoodat het in het water reikt, dan ziet men aan de beweging van het vochtkolommetje bij D dat de bovenste lagen der vloeistof zich zeer langzaam verwarmen. Doet men in plaats van water eene andere vloeistof in het glas, dan zal men hetzelfde waarnemen. Despretz heeft bevonden (1839), dat de wet, volgens welke de warmte zich in vloeistoffen voortplant, dezelfde is, volgens welke de voortplanting in vaste ligchamen plaats heeft. Hij bediende zich bij dit onderzoek van een met water gevulden houten cilinder van ééne el hoog, waar bovenin een bakje met warm water geplaatst was, dat op eene temperatuur van ongeveer 77° gehouden werd. In den cilinder waren twaalf thermometers op onderling gelijke afstanden boven elkander geplaatst. Na verloop van 32 uren veranderde de stand der thermometers niet meer; alleen de zes bovenste hadden eene geringe verandering ondergaan; tot de lager gelegene deelen der vloeistof had zich de warmte niet voortgeplant. Volgens Despretz is de geleidbaarheid van water 96 maal geringer dan die van koper, dus toch nog aanzienlijker dan die van hout. Van alle vloeistof-

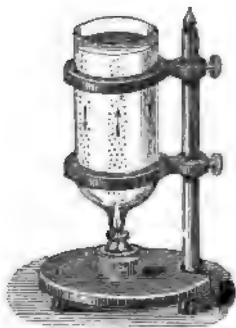
Fig. 170.



fen geleidt kwikzilver het best de warmte. Dit schijnt toe te schrijven aan zijne groote digtheid en aan zijne overeenkomst met andere metalen.

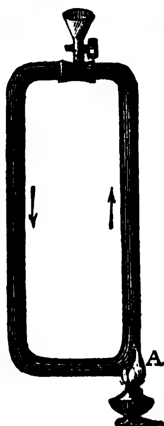
Bij de hier vermelde proeven werd steeds de warmte van boven aangebragt. Had men die van onderen toegevoerd, dan zoude de geheele vochtmassa weldra gelijkelijk verwarmd geweest zijn; in dat geval zoude zulks echter niet door eigenlijke voortplanting geschied zijn, maar door beweging en plaatsverandering der moleculen. Om zich hiervan te overtuigen behoeft men slechts een vat met glazen wanden, waarin men water heeft gedaan met een weinig houtzaagmeel of eenig ander niet oplosbaar poeder, bijv. fijngemaakte barnsteen, boven eene spiritus-lamp te verhitten. Weldra zal men aan de beweging van de in de vloeistof zwevende deeltjes bemerken, dat er, zooals in fig. 171 is afgebeeld, in 't midden eene opgaande en bij de wanden eene neergaande beweging plaats heeft. De oorzaak van die beweging is daarin te zoeken, dat de verwarmde deeltjes ten gevolge van de uitzetting, die zij ondergaan hebben, soortelijk ligter zijn geworden, en dus door de koudere en zwaardere naar boven gedreven worden.

Fig. 171.



Van deze eigenschap bedient men zich bij de zoogenaamde verwarming door warm water. Men kan zich daarvan eene voorstelling maken, wanneer men eene glazen buis, na ze in de gedaante van fig. 172 gebogen en van boven met een trechtertje en kraan voorzien te hebben, geheel met water vult en dan bij A verwarmt. Weldra ziet men, zoo men de voorzorg genomen heeft, bij het water wat barnsteenpoeder te voegen, dat er eene strooming plaats heeft in de rigting van de in de afbeelding geteekende pijltjes. Dit duurt zoo lang, tot dat de vloeistof eene gelijkmatige temperatuur verkregen heeft; ook dan nog zal de beweging voortduren, indien de horizontale deelen der buis slechts lang genoeg zijn, en dus door uitstraling zoowel deze als het zich daarin bevindende water afkoelen kan, alvorens het weder bij A komt. In de praktijk gebruikt men ijzeren buizen, waardoor het water evenzoo stroomt, als hier in de glazen buis; door het verlies van warmte aan de oppervlakte, zoowel door uitstraling, als door het gedurig daar langs strijken van de lucht, komt het water, na door de buizen rondgegaan te zijn, weder verkoeld bij A aan, en wordt dus de circulerende beweging onderhouden.

Fig. 172.



174. **Geleidend vermogen van gassen.** — Lucht en alle andere gassoorten zijn buiten twijfel zeer slechte warmtegeleiders; het geleidend vermogen laat zich echter zeer moeijelijk bepalen wegens het aanzienlijk doorlatingsvermogen, alsook door de groote bewegelijkheid van de deeltjes. De voortplanting van warmte in de lucht geschiedt door dergelijke stroomingen, als wij bij de vloeistoffen hebben waargenomen; men kan zich daarvan overtuigen, wanneer men slechts de beweging der lucht nabij eene kagchel nagaat.

175. **Toepassingen.** — Van het grooter of geringer geleidend vermogen der warmte bij onderscheidene stoffen wordt in het dagelijksch leven veelvuldig partij getrokken. Metalen werktuigen, die tot eene hooge temperatuur moeten worden gebragt, worden van houten handvatsels voorzien, omdat hout een slechte warmtegeleider is. Moet men een warm ligchaam met de hand aannemen, dan omwikkelt men deze eerst met een linnen doek of eene andere stof, die de warmte slecht geleidt. Bij de zoogenaamde brandkasten zijn de wanden zamengesteld uit twee evenwijdige platen, wier tusschenruimte is opgevuld met kurk, gestampte koolasch en dergelijke stoffen. Veelal ook rigt men ze zoo in, dat op de meeste plaatsen zich eene laag lucht tusschen die platen bevindt; wegens het gering geleidend vermogen der lucht kan zich de warmte dan niet anders dan door uitstraling voortplanten. In den winter omwindt men de boomen en heesters met stroo, om te voorkomen dat zij bevriezen. De kleederen, welke wij gebruiken, verwarmen des te beter, naarmate zij slechtere warmtegeleiders zijn; de warmte van het ligchaam heeft dan minder gelegenheid om naar buiten te komen. De dubbele ramen aan onze vertrekken beletten voornamelijk, dat de warmte er uitgaat, daar de luchtlaag, welke zich tusschen de beide ramen bevindt, een zeer slechte warmtegeleider is.

Het is ook aan dezelfde oorzaak toe te schrijven, dat een metalen voorwerp ons veel kouder toeschijnt, zoo wij het in de hand nemen, dan een even warm houten voorwerp. Dit geschiedt, omdat het metaal, als een goede warmtegeleider, terstond de warmte aan onze hand ontneemt, of wat hetzelfde is, daarin het gevoel van koude veroorzaakt. Houdt men fijn metaalgaas dwars in de vlam van eene spirituslamp, dan schijnt deze als afgesneden. Dit is daaraan toe te schrijven, dat het metaalgaas, een goed warmtegeleider zijnde, zooveel warmte aan het gas ontneemt, dat dit boven hetzelve niet meer branden kan, tenzij men het op nieuw aansteekt. Hierop berust de inrigting van de in de mijnen gebruikelijke veiligheidslamp van Davy, die eigenlijk slechts bestaat uit een gewoon olielampje, dat door een in den vorm van een cilinder gebogen metaalgaas van alle kanten omgeven is. De vlam blijft daardoor altijd

binnen het cilindertje, en er is geen gevaar, dat de in de kolenmijnen doorgaans aanwezige brandbare gassen ontploffen. Bij het gebruik van de lamp van Davy is toch nog de grootste voorzigtigheid aan te bevelen.

D. UITZETTING DOOR WARMTE.

176. **Lineaire en kubieke uitzetting; uitzettingscoëfficient.** — Reeds herhaaldelijk hebben wij melding gemaakt van de eigenschap, dat alle ligchamen zich door de warmte uitzetten. Door zoodanige uitzetting worden de afstanden tusschen de moleculen grooter, en de zamenhang van de deeltjes wordt dus verminderd. Wij weten, dat dit zoo ver kan gaan, dat een ligchaam van den vasten tot den vloeibaren of van dezen tot den gasvormigen toestand kan overgaan. Ons vooreerst bepalende tot de uitzetting zonder verandering van aggregatie-toestand, zullen wij de wetten van deze verschijnselen trachten op te sporen.

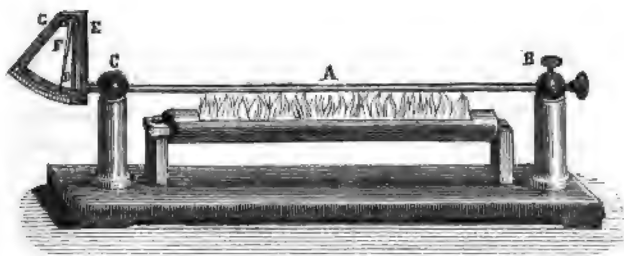
Hoe meer een ligchaam verwarmd wordt, des te aanzienlijker is dè uitzetting. Zij is evenwel niet juist evenredig aan de vermeerdering der warmte, althans niet wanneer de ligchamen tot hooge temperatuur verhit worden, zoodat zij op het punt zijn om van aggregatie-toestand te veranderen. Bij die stoffen, waarbij deze verandering niet dan bij hooge temperaturen plaats heeft, mag men echter, zoo als uit proefnemingen gebleken is, tusschen 0° en 100°, en zelfs nog daarboven, de uitzetting evenredig aan het aantal graden aannemen.

Men moet evenwel onderscheid maken tusschen uitzetting volgens ééne afmeting of de zoogenaamde *lineaire* uitzetting, en de vermeerdering in volume of *kubieke* uitzetting. Door *uitzettings-coëfficient* verstaat men het getal, dat aanduidt, hoeveel de uitzetting voor de eenheid van lengtemaat bedraagt voor 1° C. Duidt men dus door α den uitzettings-coëfficient aan, dan zal een ligchaam, dat bij 0° C eene lengte L heeft, bij eene temperatuur t eene lengte hebben, die wordt uitgedrukt door $L(1+\alpha t)$. Indien een ligchaam volkomen homogeen en de uitzetting in alle rigtingen gelijk is, dan zal om gelijke reden een volume V bij 0°, bij eene temperatuur t aangegroeid zijn tot eene volume $V(1+\alpha t)^3$, omdat de inhouden van gelijkvormige ligchamen zich verhouden als de derde magten der gelijkstandige ribben. Herleidt men deze formule, en neemt men daarbij in aanmerking, dat de coëfficient α in de meeste gevallen zeer klein is, zoodat men zijne tweede en derde magt zonder onnaauwkeurigheid kan verwaarloozen, dan verandert deze formule in $V(1+3\alpha t)$; waaruit men afleidt, dat *de kubieke uitzetting het drievoud is van de lineaire uitzetting.*

177. **Uitzetting van vaste ligchamen.** — Eene eenvoudige en duidelijke proef van de uitzetting van vaste ligchamen is de volgende, door onzen landgenoot 's Gravesande uitgedacht. Men neemt een metalen bal, die naauwkeurig in eenen metalen ring past, doch zoo, dat hij, daarop liggende, bij de gewone temperatuur er juist nog door kan vallen. Verwarmt men den bal; door hem in kokend water of in het vuur te leggen, dan zal men bevinden, dat hij niet door den ring kan, maar er op blijft liggen; hij moet dus in volume zijn toegenomen. Bekoelt hij, dan zal hij ook weder inkrimpen en door den ring vallen.

Zeer duidelijk kan men ook de uitzetting van vaste ligchamen door middel van den in fig. 173 afgebeelden toestel aantoonen. A is eene metalen staaf, die door middel

Fig. 173.

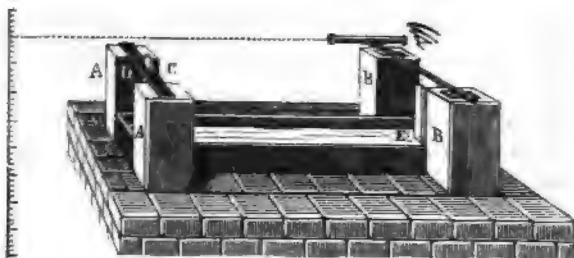


van spiritusvlammen kan verwarmd worden, en bij B bevestigd is, terwijl zij door de opening in het kolommetje C vrij heenschuiven kan. Als de staaf zich uitzet, dan zal zich dus haar linkeruiteinde naar den linkerkant verplaatsen. Dit drukt op den hefboom DE, en deze werkt weder op den wijzer F, die dus, naarmate de temperatuur der staaf toeneemt, zich meer naar den linkerkant zal bewegen. Een stalen veêrtje G doet hem teruggaan, als de staaf weder inkrimpt.

Met zoodanigen toestel zoude men den uitzettings-coëfficient van het metaal, waaruit de staaf vervaardigd is, kunnen bepalen, indien men slechts een middel had om de temperatuur naauwkeurig aan te wijzen; daartoe is echter dit werktuig niet geschikt. De uitzetting van verschillende vaste ligchamen is met naauwkeurigheid bepaald door Laplace en Lavoisier (1782). De toestel, waarvan zij zich bedienden, bestond uit vier stevige in den grond gemetselde steenen AABB (Fig. 174), tusschen welke zich een bak bevond, die met water of eene andere vloeistof kon gevuld worden. In dezen bak werd de staaf geplaatst, waarvan men den uitzettings-coëfficient wilde waarnemen. Op de twee

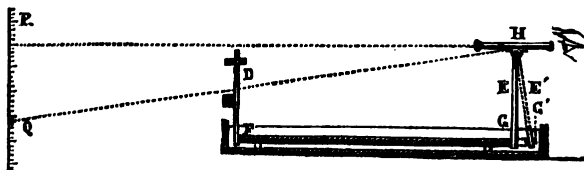
steenen AA was eene ijzeren staaf C bevestigd, waaraan wederom eene glazen plaat D verbonden was, tegen welke het uiteinde van de in het water ge-

Fig. 174.



plaatste staaf aankwam. Tegen het andere uiteinde drukte eene dergelijke glazen staaf E, die bevestigd was aan eene ijzeren as, welke om de beide scharnieren op BB kon draaijen. Aan deze as was bovendien een kijkertje verbonden, waarmede men de verdeelingen op eene op eenigen afstand geplaatste verdeelde schaal kon aflezen. In fig. 175 is de toestel in doorsnede

Fig. 175.



voorgesteld; de inrigting zal daaruit nog duidelijker blijken. Men begon met in den bak water van eene bepaalde temperatuur, zoo mogelijk van 0°, te schenken; de staaf nam daardoor eene bepaalde lengte aan Haar eene uiteinde F bleef onbewegelijk tegen de glazen plaat D; het andere uiteinde G daarentegen drukte tegen E, en bragt het kijkertje in een bepaalden stand. Stellen wij eenvoudigheidshalve, dat deze de in de figuur aangewezen horizontale stand was, en dat het kijkertje op een punt P van de schaal was gerigt. Het koude water in den bak werd vervolgens vervangen door warm water; de staaf zette zich uit, deed het glazen plaatje E om de as draaijen, en den stand E′ aannemen; het kijkertje veranderde daardoor ook van rigting. Zoodra men kon onderstellen, dat de

warmte zich geheel aan de staaf FG had medegedeeld, en dat de lengte van deze dus niet meer veranderde, werd de temperatuur van het water naauwkeurig bepaald, en tevens de verdeeling bij Q op de verdeelde schaal afgelezen. De uitzetting GG′ kon nu gemakkelijk bepaald worden; want uit de gelijkvormige driehoeken HGG′ en HPQ volgt terstond de evenredigheid PH : PQ = HG : GG′, waarin de drie eerste termen bekend zijn, en dus GG′ kan berekend worden. De uitzettings-coëfficient wordt dan gevonden door de formule $\alpha = \frac{l}{Lt}$, wanneer L de lengte FG, l de uitzetting GG′, en t het verschil in temperatuur van het water bij de eerste en de tweede aflezing beteekent.

Uit de onderzoekingen van Laplace en Lavoisier, alsook uit de latere van Roy, Troughton en anderen is gebleken, dat, zoo als wij reeds hebben opgemerkt, de uitzetting tusschen 0° en 100° als evenredig met de vermeerdering van temperatuur kan beschouwd worden. De uitzettings-coëfficienten van de voornaamste vaste ligchamen zijn in de volgende tabel vermeld, met bijvoeging van de namen der waarnemers.

Namen der stoffen.	Uitzettings-coëfficienten.	Namen der waarnemers.
Glas (Flintglas).	0,000008116	Lavoisier en Laplace.
Glas (Fransch)	0,000008613	Dulong en Petit.
Platina	0,000008565	Borda.
Staal.	0,000010792	Lavoisier en Laplace.
Gegoten ijzer.	0,000011100	Roy.
Gesmeed ijzer.	0,000012204	Lavoisier en Laplace.
Goud.	0,000014660	„ „
Koper (rood).	0,000017173	„ „
Koper (geel)	0,000018782	„ „
Zilver	0,000019097	„ „
Tin	0,000022833	Smeaton.
Lood.	0,000028666	„
Zink	0,000029416	„

Voor droog hout is de uitzetting in de rigting van de vezels zeer gering; zij bedraagt nog minder dan die van glas.

Het is opvallend, dat van de in de tabel voorkomende metalen over het algemeen die met geringe uitzettings-coëfficienten ook de minst smeltbare zijn.

Berthollet heeft hieruit afgeleid, dat een metaal zich des te sterker uitzet, naarmate het meer nadert tot de temperatuur, bij welke het smelt. De proeven hebben de juistheid van deze gissing getoond. Het is namelijk gebleken, dat de uitzettings-coëfficienten bij hoogere temperatuur grooter zijn dan de in de tabel opgegevene, en steeds grooter worden, naar mate de warmte meer nadert tot die, waarbij de metalen smelten.

Ook ijs zet zich uit door de warmte en trekt zich zamen door koude. Brunner (1845) heeft zijne digtheid bij verschillende temperaturen bepaald, en daaruit afgeleid, dat de uitzettings-coëfficient tusschen — 6° en 0° ongeveer 0,0000375 bedraagt.

Bij homogene ligchamen is de uitzetting in alle rigtingen dezelfde. Bij kristallen is dit echter niet het geval, zoo als gebleken is uit de onderzoekingen van Mitscherlich (1824). Uit zijne waarnemingen aangaande een kristal van kalkspath, hetwelk den vorm van een rhomboëder heeft (Fig. 19), bleek, dat de uitzetting in de rigting der kleinste diagonaal grooter was dan in elke andere rigting.

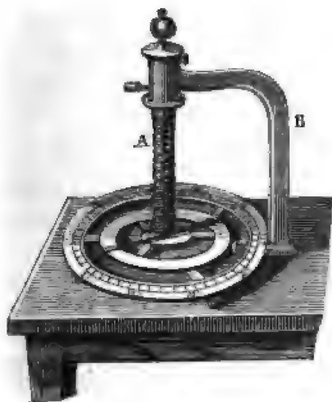
178. **Gevolgen en toepassingen van de uitzetting van vaste ligchamen.** — De uitzetting, welke de vaste ligchamen door de warmte ondergaan, is niet alleen oorzaak van verscheidene verschijnselen, die wij dagelijks waarnemen, maar men kan er ook een nuttig gebruik van maken. Het zal gemakkelijk zijn, zoowel het een als het ander door eenige voorbeelden op te helderen.

Houdt men een glas met dikken bodem boven eene spirituslamp, of plaatst men het op eene warme kagchel, dan barst of springt het. Door het gering geleidend vermogen van het glas kan de warmte zich niet spoedig genoeg aan alle deeltjes mededeelen; sommige hebben zich dus reeds aanmerkelijk uitgezet, terwijl dit bij andere digtbij gelegene nog niet het geval is; daardoor ontstaan verwringingen, die ten gevolge hebben, dat het glas breekt. Is de bodem van het glas dun en bevindt er zich eene vloeistof in, dan plant zich de warmte schielijker tot deze over, en wordt gelijkmatiger over de geheele massa verdeeld. Is glas gloeijend of zeer heet gemaakt, dan is het voldoende het met een koud ijzer aan te raken, om het te doen springen; dit is ook een gevolg van de inkrimping op de aangeraakte plaats, waar de warmte terstond in het metaal, dat een goede geleider is, overgaat. De rails op de spoorwegen mogen niet aan elkander raken, daar zij anders tengevolge van de uitzetting door de zonnewarmte tegen elkaar zouden drukken, waardoor ligtelijk bogten zouden kunnen ontstaan. De ijzeren hoepels om de kuipen en de velgen van de raderen der rijtuigen worden er warm om heengelegd, omdat zij bij bekoeling zich zamentrekken en dus naauwer aansluiten. Molard heeft op de volgende wijze van de uitzetting door de warmte gebruik gemaakt. De muren van een vertrek waren

door de drukking van het gewelf van een geweken; om dit te verhelpen bragt hij zware ijzeren staven aan, die door openingen in de beide muren gestoken, en aan den buitenkant met moerschroeven voorzien werden. Deze staven werden aan eene aanzienlijke hitte blootgesteld, waardoor eene aanmerkelijke uitzetting bewerkt werd, zoodat zij verder door de openingen van de muren heenstaken. In dien toestand werden de moerschroeven vaster aangedraaid; bij bekoeling krompen de staven weder in, en bragten zoodoende de muren weder in den loodregten stand.

De kracht, welke ontwikkeld wordt door eene staaf, die zich door de warmte uitzet, kan gemakkelijk berekend worden; daartoe behoeft men slechts na te gaan, welke kracht vereischt zoude worden om haar weder evenveel zamen te drukken, als zij zich door de warmte uitgezet heeft. Deze berekening kan geschieden door middel van de formule en de waarde van den modulus van volstrekte veêrkracht, die wij hierboven (18) gegeven hebben. Stellen wij, dat wij eene ijzeren staaf hebben, waarvan de doorsnede D 20 vierkante duimen bedraagt, en dat deze van 10° tot 100° C verwarmd wordt, dan zal de uitzetting $90 \times 0{,}0000122 = 0{,}0011$ bedragen; dit is dus de waarde van $\frac{l}{L}$ in bovengemelde formule, waarin blijkens de tabel op bladz. 17 $E = 2000000$ moet genomen worden. Voor de kracht P vinden wij dus 44000 ponden. Zoodanige kracht zoude dus noodig zijn om de uitzetting te beletten, en eene gelijke kracht zal dus door die uitzetting of door de daaropvolgende inkrimping kunnen ontwikkeld worden, indien namelijk de grens van de veêrkracht niet wordt overschreden.

Fig. 176.



179. **Thermometer van Bréguet.** — Van de ongelijke uitzetting van verschillende metalen heeft Bréguet gebruik gemaakt, om een zeer gevoeligen thermometer te construeren. Drie plaatjes van zilver, goud en platina worden tegen elkander gesoldeerd en zeer dun geplet; daaruit wordt eene smalle strook gesneden, die spiraalvormig wordt opgewonden, zoo als in fig. 176 bij A is voorgesteld. Deze spiraal wordt met het eene uiteinde aan den standaard B bevestigd, en aan het andere uiteinde wordt een ligte wijzer vastgemaakt. Ten gevolge van de meerdere uitzetting van het zilver zal zich de spiraal,

indien het zilver de buitenste laag uitmaakt, bij verhooging van temperatuur sterker krommen, en zal dus de wijzer bewogen worden. Door vergelijking met eenen gewonen thermometer maakt men op den cirkel C verdeelingen, die dan met juistheid den warmtegraad zullen aanwijzen. Dit werktuig onderscheidt zich door groote gevoeligheid, maar vereischt eene zeer voorzigtige behandeling.

Somtijds rigt men deze soort van thermometers nog anders in, door aan de drievoudige metalen strook den vorm van eene letter U te geven, en haar aan het eene uiteinde vast te maken. Bij meerdere of mindere kromming drukt dan het andere uiteinde tegen een hefboompje, dat weder met een wijzer in verband staat.

180. **Pyrometers.** — De ongelijke uitzetting der metalen kan ook in toepassing gebragt worden om hoogere warmtegraden aan te wijzen, dan met de gewone thermometers geschieden kan; aan zoodanige werktuigen geeft men den naam van *pyrometers*. Die van Régnier bestaat uit twee staven, eene regte koperen en eene gebogene ijzeren staaf, waarvan de uiteinden aan elkander gesoldeerd zijn. Daar het koper zich meer uitzet dan het ijzer, zoo zal bij verhooging van temperatuur de kromming van de ijzeren staaf geringer worden; en daar deze op eene dergelijke wijze met een wijzer voorzien is, als de in fig. 4 (bladz. 20) afgebeelde dynamometer van Régnier, zal men ook hier de temperatuur kunnen aflezen, indien men eerst de verdeelingen door vergelijking met eenen anderen thermometer heeft gemaakt.

De pyrometer van Brongniart bestaat uit eene ijzeren staaf, die rust in een gootje, dat in eene porseleinen plaat gemaakt is. Het eene uiteinde van de staaf drukt onbewegelijk tegen het eind van het gootje, het andere tegen eene porseleinen staaf, welke weder tegen eenen hefboom en eenen wijzer drukt, die op gelijke wijze zijn ingerigt, als die in fig. 173. Deze toestel wordt gebruikt om de temperatuur van een oven te bepalen; te dien einde plaatst men hem zoodanig, dat de ijzeren staaf zich in den oven bevindt, doch dat de porseleinen staaf, althans dat gedeelte, dat met den hefboom en den wijzer in aanraking is, er buiten blijft. De constructie van dezen pyrometer berust op de uiterst geringe uitzetting van porselein, zelfs bij zeer hooge temperaturen.

Het valt echter niet te ontkennen, dat deze pyrometer, even als die van Wedgwood, die gegrond is op de zamentrekking, welke klei door de werking van de warmte ondergaat, verre van naauwkeurig is, en hoogstens kan dienen om verschillende hooge temperaturen onderling te vergelijken, doch niet om elke op zich zelve met juistheid te bepalen.

181. **Compensatie-slingers.** — Toen wij van de beweging van den slinger gesproken hebben (52—54), hebben wij gezien, dat de tijd der slingeringen afhankelijk is van de lengte. Daar deze evenwel bij hoogere warmtegraden toeneemt, zal de tijd eener slingering alsdan langer duren, en een slingeruurwerk zal dus in den zomer langzamer gaan dan in den winter. Om in dat gebrek te voorzien, heeft men gebruik gemaakt van de ongelijke uitzetting van verschillende metalen, ten einde slingers te construeren, die bij alle warmtegraden dezelfde lengte behouden. Aan deze soort van slingers heeft men den naam van *compensatie-slingers* gegeven. Wij zullen de voornaamste inrigtingen van dien aard kortelijk beschrijven.

De compensatie-slinger van Graham (1730) bestaat uit eene glazen staaf AB (Fig. 177), aan wier uiteinde een glazen cilinder C is bevestigd, waarin zich kwikzilver bevindt. Door de warmte zullen zich de staaf en de cilinder uitzetten; tevens echter zet zich het kwikzilver, zoo als wij weldra zien zullen, in veel sterker mate uit. Men zal de hoeveelheid kwikzilver zoodanig kunnen regelen, dat voor elke temperatuur het zwaartepunt, of eigenlijk het schommelpunt, ten gevolge van de uitzetting van het glas evenveel naar beneden wordt verplaatst, als het door de uitzetting van het kwikzilver moet rijzen.

Fig. 177.

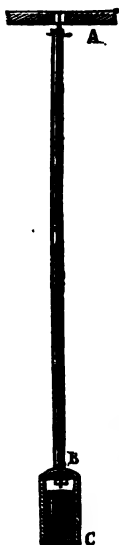


Fig. 178.

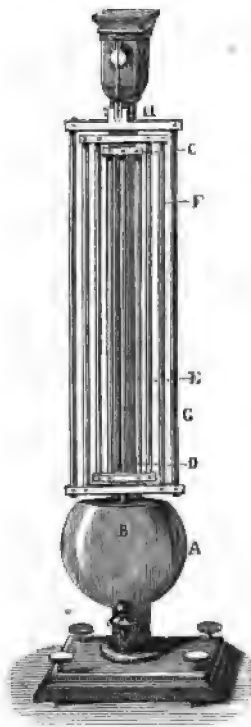


De slinger van Graham is echter weinig in gebruik. Eenvoudiger is die van Reid (1812), welke bestaat uit eene stalen staaf AB (Fig. 178), aan wier uiteinde een zinken cilindertje BC is bevestigd, dat de stalen staaf omsluit, en aan welks boveneinde C het lensvormig ligchaam D bevestigd is, dat dan door de uitzetting van het zinken buisje evenveel moet worden opgeligt, als het door de uitzetting van de stalen staaf naar beneden zakt. Deze inrigting is nog vereenvoudigd door Robert, die eene staaf van platina nam, op wier benedenste uiteinde eene uit zink vervaardigde lens rustte. Om het middenpunt der lens, dat weinig van het schommelpunt zal verschillen, steeds op dezelfde plaats te houden, is het voldoende, dat de verhouding tusschen de lengte van de platina-staaf en

den straal van de lens dezelfde is, als die tusschen de uitzettings-coëfficienten dier beide metalen, namelijk als 7 : 2.

Een van de meest gebruikelijke compensatie-slingers is die van Harrisson (1725), welke in fig. 179 is afgebeeld. De lens A is hier verbonden met de middelste stalen staaf B, wier boveneinde is bevestigd aan een dwarsstuk C; in dit dwarsstuk zijn ter weerszijden twee geelkoperen staven D bevestigd, welke van onderen weder verbonden zijn met een dwarsstuk, waaraan twee naar boven gaande stalen staven E zijn vastgemaakt. Deze zijn op gelijke wijze van boven met twee koperen staven F, en deze laatste van onderen weder met twee stalen staven G verbonden. Deze vereenigen zich van boven in een dwarsstuk H, waaraan dus eigenlijk de geheele slinger hangt. Het is ligt in te zien, dat de stalen staven door hare uitzetting de lens naar beneden brengen, terwijl daarentegen de koperen staven haar zullen opligten. Zal de compensatie volkomen zijn, dan moet de uitzetting der koperen staven dezelfde zijn als die der stalen. Noemt men a, a_1 en a_2 de lengten der stalen staven B, E en G, b en b_1 die der koperen staven D en F, dan is de uitzetting van eerstgenoemden 0,0000108 $(a + a_1 + a_2)$, van laatstgenoemden 0,0000188 $(b + b_1)$; daar deze hoeveelheden aan elkander gelijk moeten zijn, zal men de lengten der verschillende staven zoodanig moeten regelen, dat nagenoeg $a + a_1 + a_2 = \frac{7}{4}(b + b_1)$. Daar de lengte van den slinger wordt uitgedrukt door $l = (a + a_1 + a_2) - (b + b_1)$, zoo zal men vinden $l = \frac{3}{4}(b + b_1)$, of $b + b_1 = \frac{4}{3} l$. Moet de slinger een secondeslinger en dus $l = 0{,}994$ el zijn, dan moet men zorgen dat de gezamenlijke lengte $(b + b_1)$ der koperen staven D en F 1,325 el bedraagt. Men zal ligt inzien, dat deze berekening slechts benaderend is, daar wij vooreerst geene rekenschap hebben gehouden van het staafje, dat het dwarsstuk H aan het ophangpunt verbindt, en in de tweede plaats eene naauwkeuriger bepaling van de plaats van het schommelpunt noodzakelijk is.

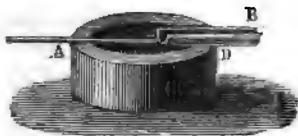
Fig. 179.



182. **Proef van Trevelyan.** — Men neemt een stuk lood van de in

fig. 180 afgebeelde ringvormige gedaante, en legt daarop eene warm gemaakte ijzeren of geel koperen staaf B, die in den vorm van eene goot is uitgehold. De warmte der staaf zal zich in het aanrakingspunt D aan het lood mededeelen, dat zich daardoor uitzet en de daarop liggende staaf tracht op te ligten. Dit geschiedt plotseling, en de staaf wordt dus als 't ware opgeworpen; intusschen verspreidt zich de warmte weder in het lood, en op het oogenblik, dat de staaf andermaal met het koude metaal in aanraking komt, deelt zij aan dit weder een gedeelte van hare warmte mede. Hetzelfde verschijnsel herhaalt zich aldus verscheidene malen, en de schokken volgen elkander zoo schielijk op, dat er een toon ontstaat. De uitgeholde vorm van de staaf dient alleen om de aanraking te verminderen, en om haar gelegenheid te geven, om een min of meer scherpen kant heen en weder te trillen.

Fig. 180.



Dit verschijnsel wordt naar den ontdekker de proef van Trevelyan genoemd. Lang is men in strijd geweest, om eene goede verklaring te vinden; thans echter wordt de door ons gegevene, die men aan Faraday verschuldigd is, voor de juiste gehouden. Tyndall heeft aangetoond, dat men het koude lood kan vervangen door een ander metaal, en zelfs door een stuk glas, kwarts of porselein. Met lood gelukken de proeven doorgaans het best.

183. **Uitzetting van vloeistoffen.** — Daar vloeistoffen niet anders kunnen onderzocht worden, dan in een vat opgesloten, zoo is het verschijnsel der uitzetting bij deze meer zamengesteld; bij vermeerdering toch van warmte zal niet alleen de vloeistof, maar ook het vaste ligchaam, waarin zij bevat is, zich uitzetten, en van deze laatste moet dus rekenschap gehouden worden bij de bepaling der eerste. Men spreekt daarom van *schijnbare* uitzetting, dat is van die, welke wordt waargenomen aan de vloeistof, terwijl zij zich in het vat bevindt, en van *volstrekte* uitzetting, of die, welke op de vloeistof alleen betrekking heeft Het spreekt voorts van zelf, dat hier alleen van kubieke uitzetting sprake kan zijn.

Van den invloed van de uitzetting van het vat kan men zich overtuigen door de volgende eenvoudige proef. Men neemt eenen niet al te dunnen glazen bol, waarmede eene glazen buis verbonden is, en die zoo ver met een gekleurd vocht gevuld is, dat dit tot in de buis staat. Dezen dompelt men in warm water; de warmte deelt zich eerst mede aan het glas, dat zich uitzet; daardoor wordt de inhoud van den bol vergroot, en het vocht daalt in de buis.

Weldra echter deelt zich de warmte ook aan de vloeistof mede, en door de uitzetting van deze klimt het vocht in de buis nog hooger dan tot zijnen oorspronkelijken stand.

De naauwkeurigste waarnemingen omtrent de uitzetting der vloeistoffen, en in de eerste plaats van kwikzilver, zijn geschied door Dulong en Petit (1818). Zij zijn daarbij uitgegaan van het beginsel, dat eene vloeistof in twee gemeenschap hebbende vaten even hoog moet staan (63), doch dat dit niet meer het geval kan zijn, wanneer de temperatuur en dus ook de digtheid in de beide vaten verschillend zijn. De toestel, waarvan zij zich bedienden, is afgebeeld in

Fig. 181.

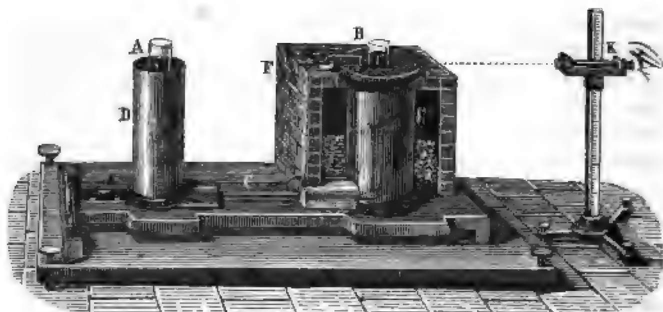
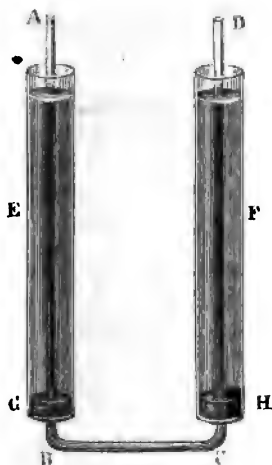


fig. 181. Twee glazen vaten A en B, die met elkander gemeenschap hebben door middel van eene zeer naauwe buis C, zijn beide met kwikzilver gevuld. A is omringd van een metalen cilinder, waarin zich smeltend ijs bevindt, dat op eene temperatuur van 0° gehouden wordt; B is besloten in een dergelijken cilinder E, die met olie gevuld is, welke door den oven F (in de figuur slechts gedeeltelijk geteekend) verwarmd wordt; een daarin geplaatste thermometer geeft de temperatuur aan, welke ook die van het kwikzilver in B is. Door de hoogten der beide kwikkolommen in A en B door middel van den kathetometer K (eene verdeelde metalen staaf, waarlangs een horizontaal kijkertje op en neêr kan bewogen worden) te meten, is men in staat de uitzetting van het kwikzilver te bepalen. Stelt namelijk d de digtheid voor van kwikzilver bij 0° C, en is α de uitzettings-coëfficient, dan zal, daar de digtheid afneemt in dezelfde reden als het volume vermeerdert, de digtheid bij eene temperatuur t worden voorgesteld door $\frac{d}{1+\alpha t}$; zijn voorts h en h' de hoogten der kwikkolommen in A en B, dan zal $hd = \frac{h'd}{1+\alpha t}$ moeten zijn,

waaruit men afleidt $\alpha = \frac{h' - h}{ht}$. Op deze wijze heeft men voor den volstrekten uitzettings-coëfficient van kwikzilver tusschen 0° en 100° gevonden $\frac{1}{5550}$ of 0,0001802. Voor hoogere temperaturen is die een weinig grooter, vooral als men tot het kookpunt van kwikzilver (360°) nadert. Latere onderzoekingen van Regnault (1847) hebben doen zien, dat de uitkomsten, door Dulong en Petit verkregen, als naauwkeurig te beschouwen zijn.

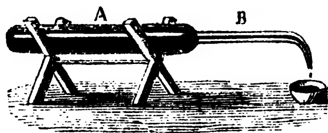
Men kan zich door middel van een eenvoudigen toestel eene voorstelling maken van het beginsel waarop de onderzoekingen van Dulong en Petit gegrond zijn. Men neemt te dien einde eene lange glazen buis, en buigt die in den vorm ABCD (Fig. 182). Vervolgens neemt men twee zeer wijde glazen buizen E en F, die men door middel van doorboorde doch naauwsluitende kurken bij G en H om de dunnere buis bevestigt. In de buis ABCD schenkt men alcohol, dien men met de eene of andere kleurstof gekleurd heeft; deze zal dan in beide armen even hoog staan. Wordt nu de buis E met zeer koud en F met warm water gevuld, dan zal weldra bij D het gekleurde vocht aanmerkelijk hooger staan dan bij A.

Fig. 182.



De schijnbare uitzetting van kwikzilver is door Dulong en Petit bepaald door middel van het in fig. 183 afgebeelden toestelletje. Het bestaat uit eene cilindrische glazen buis A, waarmede een capillairbuisje B verbonden is, dat aan het uiteinde is omgebogen. Het cilindertje wordt bij eene temperatuur van 0° met kwikzilver gevuld, en daarna aan eene hoogere temperatuur blootgesteld; daardoor zal een gedeelte van het kwikzilver er uit komen, dat gewogen wordt. Heeft men bovendien den toestel alleen, en met kwikzilver gevuld, gewogen, dan kan men hieruit gemakkelijk de uitzetting berekenen. Op deze wijze heeft men voor den schijnbaren uitzettings-coëfficient gevonden 0,0001543. Daar het verschil tusschen de schijnbare en de volstrekte uitzetting niet anders

Fig. 183.



kan zijn dan de kubieke uitzetting van het glas, zoo vindt men door aftrekking voor deze 0,0000259, hetgeen overeenkomt met de waarde in de tabel op bladz. 257 voor de lineaire uitzetting van glas opgegeven.

De schijnbare uitzetting van andere vloeistoffen kan op gelijke wijze bepaald worden met den in fig. 183 afgebeelden toestel; de volstrekte kan dan daaruit afgeleid worden, door er die van het glas bij op te tellen. Voor de schijnbare uitzetting tusschen 0° en 100° heeft men de volgende waarden gevonden:

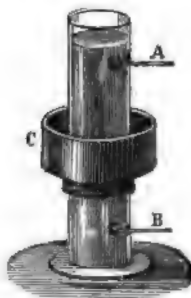
Kwikzilver.	0,01543.	Terpentijn	0,07.
Water	0,0428.	Zwavelether. . . .	0,07.
Zwavelzuur	0,06.	Alcohol	0,11.
Chloorwaterstofzuur .	0,06.	Salpeterzuur. . . .	0,11.

In deze tabel is de geheele uitzetting tusschen 0° en 100° opgegeven, omdat voor al deze vloeistoffen, kwikzilver alleen uitgezonderd, de uitzetting tusschen die beide warmtegraden niet als gelijkmatig kan beschouwd worden, maar integendeel de uitzettings-coëfficienten grooter worden, naarmate de temperatuur toeneemt. Door die getallen door 100 te deelen, verkrijgt men dus slechts de *gemiddelde* uitzetting voor elken graad; de ware kan niet voor alle temperaturen door een zelfde getal uitgedrukt worden.

184. **Uitzetting van het water; maximum van digtheid.** — De onderzoekingen omtrent de uitzetting van het water hebben doen zien, dat deze niet alleen niet gelijkmatig is, maar dat het zelfs, van 0° tot 4° verwarmd, zich niet uitzet, maar zamentrekt, om zich bij hoogere temperatuur weder uit te zetten. Het gevolg hiervan is, dat water niet bij 0°, maar bij 4° zijne grootste digtheid heeft.

Door eene eenvoudige proef kan men doen zien, dat water van 4° een grooter soortelijk gewigt heeft dan water van lagere of van hoogere temperatuur. Men neemt een cilinderglas, in welks wand twee thermometers A en B (Fig. 184) bevestigd zijn. Rondom dit glas is een blikken bakje C aangebragt, waarin water of ijs kan gedaan worden. Schenkt men water van 0° in het glas, en warm water in het bakje, dan zal de onderste thermometer B weldra 4° aanwijzen, terwijl de bovenste A nog op 0° staat; de zwaardere vochtdeeltjes hebben zich naar den bodem begeven. Men kan de proef ook omgekeerd doen, door in het glas water te schenken, dat een weinig warmer is dan 4°, en in den bak C ijs of een koudmakend mengsel te plaatsen; ook in dit geval zal na eenigen tijd de thermometer A 0° aanwijzen terwijl B nog op 4° staat.

Fig. 184.



Talrijke onderzoekingen zijn in het werk gesteld om met naauwkeurigheid zoowel den uitzettings-coëfficient van water, als de temperatuur, bij welke het zijne grootste digtheid bereikt, te bepalen. Uit die van Hällström (1823), Moll (1824), Despretz (1839) en Hagen (1855) volgt, dat de laatste slechts zeer weinig van 4°C verschilt, en dat men dus het naast bij de waarheid zal zijn, door, zoo als wij boven reeds gedaan hebben, daarvoor eene temperatuur van 4°C aan te nemen.

Deze eigenschap van het water is oorzaak, dat het op aanzienlijke diepten niet bevriest. In rivieren of vijvers gaan, als de temperatuur daalt, de zwaardere deeltjes, namelijk die van 4° C, naar beneden, en blijven daar, al daalt ook de temperatuur aan de oppervlakte. Zij behouden die temperatuur, omdat zoowel water als ijs slechte warmtegeleiders zijn.

185. **Invloed van de uitzetting der vloeistoffen op de bepaling van het soortelijk gewigt.** — Wij hebben, toen wij de middelen hebben aangewezen, door welke het soortelijk gewigt van vaste ligchamen en vloeistoffen wordt bepaald, de opmerking gemaakt, dat eene herleiding voor het verschil in warmte noodig is, als het op naauwkeurigheid aankomt (66). Na het voorgaande kan het niet moeijelijk zijn om aan te wijzen, hoe die herleiding geschieden moet.

Is P het gewigt van een vast ligchaam in de lucht, P_1 dat in water, dan wordt het soortelijk gewigt S voorgesteld door $\frac{P}{P—P_1}$, in de onderstelling, dat het water eene temperatuur van 4° heeft. Heeft het water eene hoogere temperatuur t, dan zal het verlies $P—P_1$ bij de weging in het water te klein zijn, daar het water dan eene geringere digtheid heeft, en dus ook eene geringere massa verplaatst is. Zij α de uitzettings-coëfficient van water, dan zal de uitzetting bij t^0 worden uitgedrukt door $(t-4)\alpha$; stelt men deze uitdrukking kortheidshalve voor door m, dan zal het gewigtsverlies $P—P_1$ moeten vermenigvuldigd worden met $1+m$, zoodat men dan voor het soortelijk gewigt vindt

$$S = \frac{P}{(1+m)\,(P—P_1)}.$$

Bij de bepaling van het soortelijk gewigt van vloeistoffen is eene dergelijke herleiding noodig. Is $P—P_1$ het gewigtsverlies van een vast ligchaam in water bij eene temperatuur t, $P—P_1$ het gewigtsverlies van hetzelfde ligchaam in de vloeistof, waarvan men het soortelijk gewigt zoekt, bij eene temperatuur t', dan zal men voor het soortelijk gewigt der vloeistof bij t' graden hebben

$$S = \frac{P—P_2}{(1+m)\,(P—P_1)}.$$

Wil men het soortelijk gewigt bij 0° bepalen, dan moet de hier gevondene waarde nog vermenigvuldigd worden met $1 + \alpha' t'$, zijnde α' de uitzettingscoëfficient der vloeistof, waarvan men het soortelijk gewigt zoekt.

186. **Correctie van den barometerstand voor de temperatuur.** — Men is gewoon, ten einde verschillende barometer-waarnemingen met elkander te kunnen vergelijken, alle te herleiden tot den stand, welke zoude zijn waargenomen, indien de temperatuur van het kwikzilver 0° C geweest was (90). Wij kunnen, daar wij de uitzetting van kwikzilver hebben leeren kennen, gemakkelijk de grootte der daarvoor aan te brengen correctie bepalen. Daar de hoogten der kwikkolom omgekeerd evenredig moeten zijn aan de digtheden, zoo is het voldoende de digtheid van kwikzilver bij eene temperatuur t te bepalen. De uitzettings-coëfficient is blijkens het hierboven (183) gevondene $\frac{1}{5550}$; het volume bij t° is dus $\left(1 + \frac{t}{5550}\right)$ maal grooter dan dat bij 0°, en de digtheid bij t° dus evenveel maal kleiner. Is de waargenomene hoogte h, dan zal die bij 0° worden uitgedrukt door

$$h^\circ = \frac{h}{1 + \frac{t}{5550}}.$$

Voor de aan te brengen correctie $h - h^\circ$ vindt men dus $\frac{ht}{5550+t}$. Heeft men bijv. een barometerstand van 755 strepen bij eene temperatuur van 20° C waargenomen, dan zal de correctie 2,4 strepen bedragen, zoodat de barometerstand bij 0° C dan 752,6 strepen zoude bedragen hebben.

Bij naauwkeurige waarnemingen moet men nog eene andere correctie aanbrengen. Indien namelijk de temperatuur hooger is dan die, bij welke de verdeelingen op de schaal gemaakt zijn, dan zullen deze een weinig te groot en dus de afgelezen barometerstand te laag zijn. Is t_1 de temperatuur, waarbij de schaal verdeeld is, t de waargenomene temperatuur, en α de uitzettings-coëfficient van het metaal, waaruit de schaal is vervaardigd, dan moet de waargenomene hoogte nog vermenigvuldigd worden met $1 + \alpha (t - t_1)$.

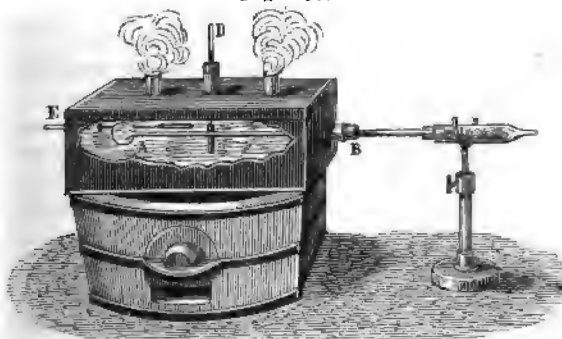
187. **Uitzetting van gassen.** — De geringe zamenhang van de gassen is oorzaak, dat hunne uitzetting door de warmte veel aanzienlijker is dan die van vaste ligchamen of van vloeistoffen. Zij is daarenboven veel regelmatiger en voor alle gassen nagenoeg gelijk.

De uitzetting van gassen kan door de volgende eenvoudige proef aangetoond worden. Men neemt eene glazen buis, aan wier eene uiteinde zich een bol bevindt, en houdt dien zoodanig, dat het andere uiteinde even onder water reikt.

Den bol verwarmt men door er de vlam van eene spirituslamp onder te houden; in den winter is het zelfs voldoende hem in de warme hand te nemen. In beide gevallen ziet men weldra luchtbellen uit de opening der buis onder het water te voorschijn komen. De lucht heeft zich dus uitgezet, zij heeft sterkere spanning verkregen en dringt naar buiten. Men kan hetzelfde verschijnsel ook op de volgende wijze aantoonen. Men steekt een glazen buisje door eene kurk, en bevestigt deze op een fleschje, dat half met water gevuld is; men draagt zorg, dat het buisje tot beneden de oppervlakte der vloeistof reikt, en plaatst nu den geheelen toestel op eene zeer warme plaats of in warm water. De lucht in het fleschje zet zich uit en tracht naar buiten te dringen. Daar er echter geene opening is, waardoor zij kan ontwijken, drukt zij op het water en perst dit door het buisje naar boven.

De bepaling van den uitzettings-coëfficient van lucht en andere gassoorten, kan ongeveer op de volgende wijze geschieden. Men neemt eene naauwe glazen buis, zoo als men ze gebruikt om thermometers te vervaardigen, en blaast aan het uiteinde een grooten bol. Men bepaalt naauwkeurig den inhoud, door de hoeveelheid kwikzilver te wegen, die noodig is om hem te vullen. Nadat men zich overtuigd heeft, dat de buis overal even wijd is, brengt men daarop verdeelingen aan, zoodanig dat elke in eene bepaalde verhouding staat tot den geheelen inhoud van den bol. Om dit te doen, is het voldoende den bol bij 0° met kwikzilver te vullen, hem daarna een weinig te verwarmen, zoodat er wat kwikzilver uitloopt, en vervolgens de temperatuur weder tot 0° terug te brengen; een gedeelte van de buis is dan ledig, welks inhoud wordt aangewezen door het volume van het kwikzilver, dat er uit geloopen is. Nadat de bol weder geheel met kwikzilver gevuld is, brengt men er volkomen drooge lucht (die men te dien einde door een buisje met stukjes chloorcalcium laat stroomen) in, totdat al het kwikzilver uit den bol verdwenen is, en nog slechts een klein kolommetje in de buis is overgebleven. Daarna brengt men haar in horizontalen stand in een ijzeren bak A (Fig. 185), zoo-

Fig. 185.



dat het kwikkolommetje B nog even daar buiten reikt. De bak A, waarin men twee thermometers D en E geplaatst heeft, wordt met water gevuld en verwarmd. Zoodra het water warmer wordt, zal de lucht in den glazen bol zich uitzetten, en het kwikkolommetje B zal zich verplaatsen. Neemt men naauwkeurig den warmtegraad van het water, welke ook die van de lucht in den bol zijn zal, alsmede de verdeelingen op de buis waar, dan zal men gemakkelijk daaruit den uitzettings-coëfficient van de lucht kunnen berekenen.

Op de hier aangewezene wijze hebben de onderzoekingen van Gay-Lussac (1802) en later die van Dulong en Petit (1816) plaats gehad, welke daaruit hadden afgeleid, dat de uitzetting evenredig is met de verhooging van temperatuur, en dat zij voor alle permanente gassen dezelfde is, wanneer namelijk de luchtdrukking geene verandering ondergaat. Latere onderzoekingen, voornamelijk die van Regnault (1842), hebben echter geleerd, dat deze uitkomsten voor zooverre het laatste betreft, niet volkomen juist zijn, en dat ook de door hen gevondene uitzettings-coëfficient 0,00375 voor de meeste gassen, en vooral voor de lucht, te groot is.

Eene beschrijving van de wijze, waarop Regnault de uitzetting van lucht en andere gassoorten heeft bepaald, meenen wij hier achterwege te kunnen laten. Het bleek hem, dat de luchtdrukking niet zonder invloed is op de uitzetting; bij hoogere drukking is deze aanzienlijker. De door hem gevondene uitzettings-coëfficienten voor éénen graad tusschen 0° en 100° zijn de volgende:

Lucht.	0,003665.
Waterstofgas	0,003667.
Stikstofgas	0,003668.
Kooloxydgas	0,003667.
Koolzuurgas.	0,003688.
Zwaveligzuurgas	0,003845.

Hij heeft tevens gevonden, dat waterstofgas het eenige is, waarvoor de uitzetting niet met de drukking toeneemt.

De groote gelijkmatigheid, waarmede de uitzetting der gassen plaats heeft, maakt dat de hierboven (153) beschrevene lucht-thermometers, wat naauwkeurigheid aangaat, de voorkeur verdienen boven alle andere. Daar echter de drukking op het volume van een gas eenen aanzienlijken invloed uitoefent, moet van deze in de eerste plaats rekenschap gehouden worden. Men moet dus òf de verandering van het volume der lucht bij verschillende temperaturen waarnemen onder eene standvastige drukking, òf omgekeerd de verandering in drukking van een zelfde volume lucht bij verschillende temperaturen. In het eerste geval zal men uit de vermeerdering van het volume der lucht

door middel van den bekenden uitzettings-coëfficient de temperatuur kunnen berekenen; op dit beginsel is een door Pouillet (1827) uitgedachte lucht-thermometer of pyrometer gegrond. In het tweede geval zal men uit de verandering in drukking door middel van de wet van Mariotte (94) de verandering van volume kunnen afleiden, en daaruit, even als in het eerste geval, de temperatuur berekenen. Regnault heeft zich bij sommige onderzoekingen van eenen op dit beginsel gegronden pyrometer bediend.

Uit een vergelijkend onderzoek van kwik-thermometers en lucht-thermometers is het aan Regnault gebleken, dat de aanwijzingen van een kwik-thermometer beneden 100° met die van den lucht-thermometer overeenkomen. Bij hoogere temperaturen zijn de aanwijzingen van den kwik-thermometer te hoog. Het verschil laat zich echter moeijelijk met juistheid opgeven, daar dit niet alleen van de minder gelijkmatige uitzetting van het kwikzilver, maar ook van die van het glas afhankelijk is.

188. **Formulen voor de berekening van het volume van een gas bij verschillende temperaturen.** — Op grond van het voorgaande is het niet moeijelijk, het volume van een gas bij eene zekere temperatuur te bepalen, wanneer men zijn volume bij eene andere temperatuur kent. Wanneer α de uitzettings-coëfficient is van een gas en V_0 zijn volume bij 0°, dan wordt het volume bij t° aangewezen door $V = V_0(1+\alpha t)$. Omgekeerd zal dus het volume bij 0° worden aangeduid door

$$V_0 = \frac{V}{1+\alpha t}.$$

Is dat bij t° bekend, en verlangt men het volume V' bij t'° te vinden dan heeft men $V = V_0(1+\alpha t)$ en $V' = V_0(1+\alpha t')$, dus

$$V' = V\frac{1+\alpha t'}{1+\alpha t}.$$

Is ook de drukking, waaraan het gas is blootgesteld, eene andere, dan wordt het volume door de wet van Mariotte bepaald. Was bijv. het gas bij t° blootgesteld aan eene drukking H, en verlangt men zijn volume te kennen bij eene temperatuur t' en eene drukking H', dan zal men daarvoor vinden

$$V' = V\frac{H(1+\alpha t')}{H'(1+\alpha t)}.$$

Onderstellen wij, om dit op een voorbeeld toe te passen, dat men in eene

buis 250 kubieke duimen koolzuurgas verzameld heeft, bij eene temperatuur van 18°C en onder eene drukking van 720 strepen, en dat men het volume begeert te vinden, dat dit gas bij eene temperatuur van 0°C en onder eene drukking van 760 strepen zoude innemen. In de laatste formule heeft men dan slechts te substitueren $V = 250$, $H = 720$, $H' = 760$, $t = 18$, $t' = 0$ en $\alpha = 0,003688$; men vindt dan $V' = 222,098$ kub. duimen.

Moet men het gewigt van een zeker waargenomen volume gas kennen, dan is het noodig om, even als in het hier gegevene voorbeeld, het volume bij 0°C en onder eene drukking van 760 strepen te berekenen, daar de digtheden, zoo als wij ze hierboven (106) hebben opgegeven, alleen voor die temperatuur en drukking gelden. Het gewigt van het gevonden volume koolzuurgas zal dus 0,4393 wigtjes bedragen.

189. **Bepaling van het soortelijk gewigt van gassen.** — Toen wij de wijze hebben opgegeven, waarop het soortelijk gewigt van gassen kan bepaald worden (106), hebben wij tevens opmerkzaam gemaakt op de omstandigheden, waarop bij die bepaling acht moet gegeven worden. In de eerste plaats moet daarbij rekenschap gehouden worden van den warmtegraad, die, zoo als wij gezien hebben, zulk eenen overwegenden invloed op het volume uitoefent. Het zal niet noodig zijn daaromtrent in meerdere bijzonderheden te treden, daar de hierboven (188) gegevene formulen ook hier toepasselijk zijn. Regnault heeft bij zijne naauwkeurige onderzoekingen aangaande de digtheid van verschillende gassoorten de voorzorg gebruikt, om den glazen bol, waarvan hij zich bediende, bij eene temperatuur van 0° met gas te vullen. Ook de drukking van het gas, dat in den glazen bol bleef wegens het onmogelijke om hem volkomen luchtledig te maken, werd bij 0° bepaald. Daar bovendien het gewigtsverlies, door het wegen van den bol in de lucht veroorzaakt, niet alleen niet buiten rekening mag gelaten worden, maar men zelfs acht moet geven op de veranderingen, waaraan dit onderhevig is bij verandering van temperatuur en van luchtdrukking, maakte hij met den bol evenwigt door middel van een anderen, die even groot en uit dezelfde stof vervaardigd was.

190. **Toepassingen van de uitzetting der gassen.** — De voornaamste toepassing van de uitzetting der gassen bestaat in de daardoor veroorzaakte bewegingen, waarop wij reeds meermalen de aandacht hebben gevestigd. Lucht en andere gassen worden soortelijk ligter, als zij zich door de warmte uitzetten; de warme lucht stijgt dus in de hoogte, terwijl de koudere naar den bodem zinkt. Om zich hiervan te overtuigen behoeft men slechts in een vertrek, waar gestookt wordt, op verschillende hoogten ther-

mometers op te hangen; die het digst bij de zoldering geplaatst zijn, wijzen de hoogste temperatuur aan. Opent men eene deur tusschen een koud en een verwarmd vertrek, dan is het evenwigt verbroken; warme lucht begeeft zich naar het koude vertrek, en omgekeerd treedt daarvoor koude lucht in de plaats. Houdt men eene aangestokene kaars eerst boven en dan beneden in de geopende deur, dan ziet men aan de rigting van de vlam, dat, terwijl er boven in de deur een stroom van warme lucht naar de koude kamer plaats heeft, omgekeerd de koude lucht onder in de deur naar het warme vertrek stroomt.

De verwarming der vertrekken heeft ook krachtens dezelfde eigenschap plaats. Toen wij de uitstraling der warmte hebben behandeld, hebben wij reeds opgemerkt, dat daardoor slechts zeer weinig warmte in het vertrek zoude komen; het is daarom, dat een zoogenaamd open vuur weinig geschikt is om een groot vertrek te verwarmen. De beste wijze van verwarming is dus die, welke tegenwoordig meestal bij de kagchels wordt in toepassing gebragt. Men laat namelijk de vlam en de verwarmde lucht door pijpen gaan, aan welke zij hare warmte grootendeels afgeven. De lucht, die met die warme buizen in aanraking is, wordt daardoor verwarmd en dus ligter, zoodat zij opstijgt, om voor nieuwe koude lucht plaats te maken. Op die wijze verkrijgt men schielijk eene zeer gelijkmatige temperatuur. Is de verdieping hoog, dan is het moeijelijk het vertrek goed te verwarmen, daar de warme lucht steeds boven blijft.

Nog een verschijnsel, naauw met de voorgaande verbonden, berust op de uitzetting der lucht door de warmte, namelijk het zoogenaamde trekken der schoorsteenen. Door de warmte van het vuur wordt de lucht in den schoorsteen verdund, de drukking in een punt in den schoorsteen is dus geringer dan die in een even hoog gelegen punt binnen in het vertrek; het evenwigt is dus verbroken, en er zal in den schoorsteen eene opstijgende strooming plaats hebben, waardoor de rook en de verbrandings-producten naar buiten gevoerd worden. Men zal echter ligtelijk inzien, dat het hiervoor noodig is, dat in het vertrek versche lucht van buiten aangevoerd wordt; doorgaans is echter die, welke door de reten van deuren en vensters binnenkomt, daartoe voldoende.

Om een sterken trek te hebben maakt men de schoorsteenen zeer hoog; de reden hiervan is gemakkelijk in te zien. De kracht toch, waarmede de lucht opstijgt, en die alleen het gevolg is van het verschil in digtheid tusschen de lucht in den schoorsteen en die in het vertrek, zal des te aanzienlijker wezen, naarmate de kolom der verwarmde en verdunde lucht grooter is. De hoogte van den schoorsteen heeft echter ook hare grenzen, daar de tegenstand, door de wrijving tegen den binnenwand veroorzaakt, toeneemt met de lengte der buis en met de tweede magt der snelheid (109).

Het lampeglas, dat op onze gewone lampen gebruikt wordt, heeft eene dergelijke uitwerking. Door de warmte der vlam wordt de lucht aanzienlijk verdund; zij stijgt naar boven, terwijl van onderen nieuwe lucht wordt aangevoerd, die voor de volkomene verbranding der gassen noodzakelijk is; daarom is de verbranding zeer onvolledig en walmt dus de lamp, als men de onderste openingen sluit.

E. SOORTELIJKE WARMTE DER LIGCHAMEN.

191. **Soortelijke warmte.** — Alvorens de andere verschijnselen te leeren kennen, welke door warmte in de ligchamen worden te voorschijn geroepen, is het noodig in eenige nadere beschouwingen te treden omtrent de hoeveelheid warmte, die zij kunnen opnemen of vrijlaten. Eene volstrekte bepaling daarvan is uit den aard der zaak onmogelijk; door verschillende ligchamen met elkander te vergelijken, heeft men zich evenwel overtuigd, dat niet alle eene zelfde hoeveelheid warmte behoeven op te nemen, om eene gelijke verandering van temperatuur te ondergaan, of om andere overeenkomstige verschijnselen te vertoonen.

De hoeveelheid warmte, die een ligchaam noodig heeft, opdat zijne temperatuur met 1° toeneme, noemt men zijne *soortelijke* of *specifieke warmte*, of ook wel zijne *warmte-capaciteit*; het is duidelijk, dat deze evenredig moet zijn aan de massa van het ligchaam. Daar echter de hoeveelheid warmte slechts vergelijkender wijze kan bepaald worden, zoo is het voldoende, indien men voor alle ligchamen eene zelfde massa als éénheid aanneemt. Neemt men hiervoor een pond, dan is de soortelijke warmte van water de hoeveelheid warmte, die vereischt wordt, om de temperatuur van een pond water met 1° te verhoogen, dus juist die hoeveelheid, die wij reeds hierboven (157) als warmte-eenheid hebben aangewezen. De soortelijke warmte van alle andere ligchamen kan dus uitgedrukt worden door getallen, waarbij die van water als eenheid wordt aangenomen.

Dat de soortelijke warmte niet bij alle ligchamen even groot is, laat zich gemakkelijk aantoonen. Voegt men bij eene zekere hoeveelheid water van eene temperatuur t eene even groote hoeveelheid water van eene hoogere temperatuur t', dan zal het mengsel de gemiddelde temperatuur $\frac{1}{2}(t + t')$ aannemen; die van de eerste hoeveelheid is even veel geklommen, als die van de andere gedaald is. Vervangt men daarentegen het warmste water door eene gelijke en even warme hoeveelheid kwikzilver, en mengt men dan door-

een, dan zal de temperatuur veel lager zijn dan bij de eerste proef. Hieruit volgt dus, dat het water van t^0 meer warmte noodig had om tot $\frac{1}{2}$ $(t + t')$ te klimmen, dan het kwikzilver kon afgeven bij de daling van t'^0 tot dien warmtegraad; in andere woorden, dat de soortelijke warmte van water veel aanzienlijker is dan die van kwikzilver.

192. **Bepaling van de soortelijke warmte door de vermengings-methode.** — De soortelijke warmte kan op verschillende wijzen bepaald worden, welke wij hier, wat de beginselen aangaat, zullen beschrijven.

De eerste methode, bekend onder den naam van de vermengings-methode, is de volgende. Men stelt het ligchaam, waarvan men de soortelijke warmte zoekt, na het gewogen te hebben, gedurende geruimen tijd bloot aan eene warmte van 100°, zoodat men zeker kan zijn, dat het geheel tot die temperatuur verwarmd is; daarna dompelt men het in eene hoeveelheid water, waarvan men eveneens het gewigt en de temperatuur bepaald heeft. Na weinige oogenblikken zullen het water en het daarin gedompelde ligchaam eene gelijke temperatuur aangenomen hebben, welke men bepaalt. Uit deze gegevens kan de soortelijke warmte van de onderzochte stof gemakkelijk berekend worden.

Zij M het gewigt van het ligchaam, T zijne temperatuur en c zijne onbekende soortelijke warmte; zij voorts m het gewigt en t de temperatuur van het water vóór de proef; m' het gewigt en c' de soortelijke warmte van het vat, waarin het water bevat is, en eindelijk t' de temperatuur van het water na de proef. Het ingedompelde ligchaam, welks temperatuur met $T—t'$ graden verminderd is, zal dus $Mc\,(T—t')$ warmte-eenheden verloren hebben; het water daarentegen, welks temperatuur met $t'—t$ graden vermeerderd is, heeft, daar zijne soortelijke warmte door de eenheid wordt voorgesteld, $m\,(t'—t)$ warmte-eenheden in zich opgenomen; het vat, dat steeds dezelfde temperatuur als het water heeft, zal $m'c'\,(t'—t)$ warmte-eenheden hebben opgenomen. Daar het verlies in warmte van het ingedompeld ligchaam gelijk moet zijn aan de winst van het water en het vat, zoo zullen wij hebben

$$Mc\,(T—t') = m\,(t'—t) + m'c'\,(t'—t).$$

Deze vergelijking heeft twee onbekenden, namelijk c en c'; men zal echter c' kunnen bepalen door voor het vat en het ingedompelde ligchaam dezelfde stof te nemen, in welk geval c door c' moet vervangen worden. Heeft men op die wijze door eene voorafgaande proef c' gevonden, en kan men deze dus als

bekend beschouwen, dan vindt men uit bovenstaande vergelijking voor de soortelijke warmte

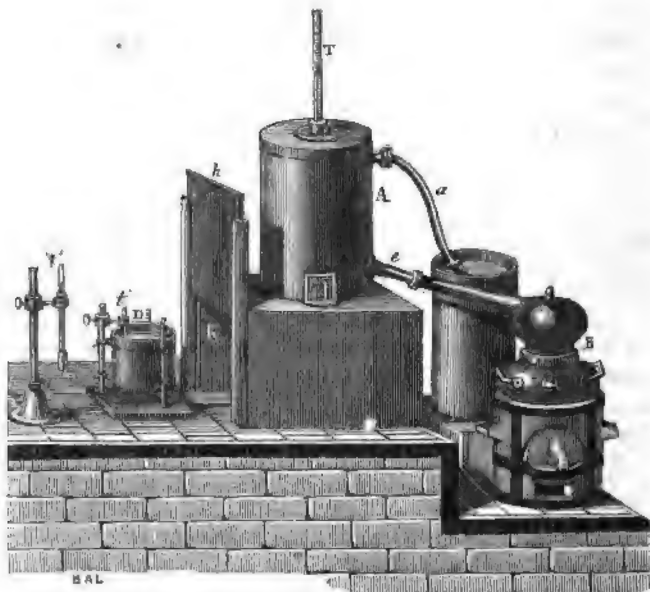
$$c = \frac{(m + m'c')(t' - t)}{M(T - t')}.$$

Den term $m'c'$ vervangt men somtijds door ééne letter μ, welke dan kan beschouwd worden als eene massa water aanduidende, die evenveel warmte zoude opnemen, als het vat gedaan heeft; het vat is dan als 't ware tot water herleid.

Bij de hier vermelde proef zal door uitstraling van het vat en van de vloeistof warmte verloren gaan. Men tracht deze zooveel mogelijk te verminderen, door de temperatuur zoodanig te kiezen, dat zij slechts weinig van die der omringende lucht verschilt.

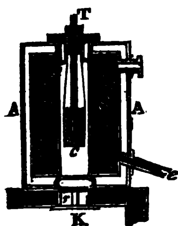
Regnault (1840) heeft talrijke proeven genomen, om de soortelijke warmte van verschillende stoffen op deze wijze te bepalen. De toestel dien hij gebruikte, is in fig. 186 afgebeeld, terwijl fig. 187 het vat A in doorsnede voorstelt. Dit vat

Fig. 186.



bestaat uit drie in elkander geplaatste cilinders; in den binnensten is in een

Fig. 187.



mandje C van koperdraad de stof geplaatst, waarvan de soortelijke warmte gezocht wordt; een daarin geplaatste thermometer T wijst de temperatuur aan. In den tweeden cilinder wordt stoom of waterdamp van 100° geleid door eene buis *e*, die van den ketel B komt; door de buis *a* ontwijkt de overvloedige damp, en komt als water in een vat, dat te dien einde daarbij geplaatst is. In den buitensten cilinder bevindt zich slechts lucht, welke dient om verlies van warmte te beletten. Deze toestel rust op eene kast K met dubbele wanden, tusschen welke zich koud water bevindt, om te beletten, dat de warmte van A zich ook onder de kast mededeelt. In den wand van die kast, juist onder den binnensten cilinder, waarin het mandje is opgehangen, is eene opening, welke door eene schuif *r* kan gesloten worden. D is een bakje met water, van een thermometer *t* voorzien, en dat onder de kast K kan geschoven worden; de thermometer *t'* dient om de temperatuur van de lucht waar te nemen. Om nu de soortelijke warmte van de stof in het mandje C te bepalen, brengt men eerst het water in B aan het koken. De stroom komt dientengevolge in A, en verwarmt langzamerhand den binnensten cilinder. Na twee of drie uren merkt men aan den thermometer T, dat de temperatuur van de stof in het mandje niet meer verandert. Nu wordt het bakje D, de *calorimeter* genaamd, onder de kast geschoven, nadat de temperatuur van het water door middel van den thermometer *t* bepaald is; de schuif *r* wordt weggetrokken, en men laat het mandje in het water zakken, in dier voege echter dat de thermometer T niet mede naar onderen gaat, doch boven in den cilinder blijft. Men beweegt het mandje in het water, en neemt aan den thermometer *t* waar, tot welken graad de temperatuur van het mengsel klimt. Door middel van de boven gegeven formulen kan men dan de soortelijke warmte berekenen.

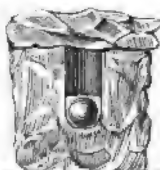
Indien het te onderzoeken ligchaam in water oplosbaar is, dan gebruikt men in den calorimeter D terpentijn in plaats van water; daartoe moet men echter eerst de soortelijke warmte van terpentijn bepaald hebben. Om de soortelijke warmte van vloeistoffen te onderzoeken, maakte Regnault gebruik van een dun glazen buisje, dat met de vloeistof gevuld, daarna toegesmolten en vervolgens in het mandje C geplaatst werd.

193. **Bepaling der soortelijke warmte door het smelten van ijs.** — De tweede methode berust op de eigenschap van ijs, volgens welke het eene bepaalde hoeveelheid warmte noodig heeft, om van den vasten tot den vloeibaren staat over te gaan, zonder dat de temperatuur toeneemt.

Wij zullen later, als wij over het smelten in het algemeen spreken, dit verschijnsel nader beschouwen, en nemen voorloopig aan, zoo als dan blijken zal, dat een pond ijs of sneeuw van 0°C 79 warmte-eenheden noodig heeft, om te veranderen in water van dezelfde temperatuur.

Om op grond van deze eigenschap de soortelijke warmte van eene stof te bepalen, neemt men een groot stuk ijs, waarin men een gat maakt, zooals in fig. 188 is voorgesteld. Het te onderzoeken ligchaam wordt tot op eene bekende temperatuur verhit en in het gat gelegd, dat terstond door een ander stuk ijs gesloten wordt. De warmte van het verwarmde voorwerp doet een gedeelte van het ijs smelten, en deze smelting duurt voort, tot dat het ligchaam en het water beide eene temperatuur van 0° hebben verkregen. Alsdan verzamelt men zorgvuldig het door smelting verkregene water en weegt dit. Stellen wij dit gewigt voor door P, dan zullen er dus P ponden ijs gesmolten zijn, waartoe 79 P warmte-eenheden noodig waren. Het ligchaam, waarvan het gewigt m, de temperatuur t en de soortelijke warmte c is, zal mtc warmte-eenheden verloren hebben. Hieruit volgt dus terstond, dat $c = \frac{79\,P}{mt}$.

Fig. 188.



Lavoisier en Laplace (1780) hebben in plaats van een blok ijs, den in fig. 189 afgebeelden calorimeter gebruikt; in fig. 190 is dezelfde in doorsnede voorgesteld. M is een met eene menigte gaatjes voorziene blikken bak, waarin het ligchaam, welks soortelijke warmte men bepalen wil, wordt gelegd. Deze bak is geheel ingesloten tusschen kleine stukjes ijs, die zich in den bak A bevinden, terwijl laatstgenoemde weder geheel is ingesloten in den met ijs gevulden bak B. Door de warmte van M zal een gedeelte van het ijs in A smelten; het daardoor ontstane water loopt uit door

Fig. 189.

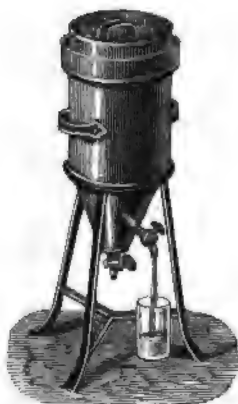
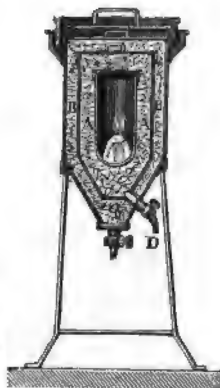


Fig. 190.



de kraan D, en wordt in een glas opgevangen, om gewogen te worden. Het ijs in het buitenste vat B dient alleen om te voorkomen, dat door de meerdere warmte van de buitenlucht een gedeelte van het ijs in A smelt.

Deze methode geeft minder naauwkeurige resultaten dan de vermengings-methode; een gedeelte van het gesmoltene water blijft nog aan het ijs in A aankleven, en het is ook moeijelijk om te zorgen, dat het ijs juist op de vereischte temperatuur van 0° blijft, en niet daaronder komt.

194. **Bepaling der soortelijke warmte door de afkoelings-methode.** — Deze methode berust op het beginsel, dat wanneer twee ligchamen van gelijke temperatuur in eene luchtledige ruimte een gelijk aantal graden in temperatuur afnemen, de verloren warmte-hoeveelheden tot elkander in reden zijn als de tijden, die tot die afkoeling noodig waren. Daar de verlorene warmte wordt uitgedrukt door het product van de massa met de soortelijke warmte en met het aantal graden, waarmede de temperatuur verminderd is, en deze vermindering voor beide gelijk genomen wordt, zoo zullen wij hebben, als t en t' de tijden aanduiden, $mc : m'c' = t : t'$; waaruit volgt

$$c' = \frac{m\,t'}{m'\,t}\,c.$$

Is dus de soortelijke warmte van eene stof bekend, dan kan men door deze proeven die van alle andere bepalen.

Regnault, die deze methode naauwkeurig heeft onderzocht, heeft aangetoond, dat zij weinig zekere resultaten oplevert, en dat dus de eerste wijze om de soortelijke warmte te bepalen, namelijk de vermengings-methode, te verkiezen is.

195. **Soortelijke warmte van eenige vaste ligchamen en vloeistoffen.** — Uit verschillende onderzoekingen, voornamelijk uit die van Regnault, is gebleken, dat de soortelijke warmte der meest voorkomende stoffen, door de volgende getallen wordt voorgesteld.

Alcohol . . .	0,6725.	Diamant . .	0,14687.
Zwavelether .	0,5157.	Staal . . .	0,1165.
Terpentijn. .	0,42593.	IJzer . . .	0,11379.
Houtskool . .	0,24111.	Kobalt . . .	0,10696.
Zwavel . . .	0,20259.	Zink. . . .	0,09555.
Glas. . . .	0,19768.	Koper . . .	0,09515.
Phosphorus .	0,17880.	Geel koper .	0,09391.

Zilver . . .	0,05701.	Goud . . .	0,03244.
Tin	0,05623.	Platina . . .	0,03243.
Antimonium .	0,05077.	Lood . . .	0,03140.
Kwikzilver .	0,03332.	Bismuth . .	0,03084.

Voor water, welks soortelijke warmte door de eenheid wordt voorgesteld, is zij dus de aanzienlijkste. Water is dus beter dan eenige andere vloeistof in staat, om eene groote hoeveelheid warmte op te nemen en ook weder af te geven; daarom is het ook het meest geschikt voor de wijze van verwarming, die wij boven (173) beschreven hebben. Kwikzilver heeft eene zeer geringe soortelijke warmte; er is dus slechts weinig warmte noodig, om het in temperatuur te doen klimmen; daarom is het zoo bijzonder geschikt om in thermometers gebruikt te worden. Zijn een kwik-thermometer en een alcohol-thermometer aan eene zelfde warmtebron blootgesteld, dan zal de eerste schielijker de juiste temperatuur aanwijzen dan de tweede.

De boven gegevene waarden voor de soortelijke warmte van vaste ligchamen zijn die, welke gevonden zijn voor temperaturen tusschen 0° en 100°. Uit de onderzoekingen van Dulong en Petit (1819) is het gebleken, dat de soortelijke warmte met de temperatuur toeneemt, wanneer deze boven 100° komt. Voor de in de tabel voorkomende vloeistoffen is zij tusschen 0° en 100° niet als zoo standvastig te beschouwen; de opgegevene waarden gelden tusschen 15° en 20°, terwijl zij voor lagere temperatuur iets geringer zijn. Ook water heeft bij eene hoogere temperatuur eene grootere soortelijke warmte; zij neemt echter voor water niet zoo schielijk toe, als voor andere vloeistoffen.

Uit onderzoekingen van Person (1849) en anderen is gebleken, dat de soortelijke warmte van een zelfde ligchaam verschilt, naar gelang het zich in den vasten of in den vloeibaren staat bevindt. Vooral voor water en ijs is dit verschil groot, daar de soortelijke warmte van ijs slechts 0,504 bedraagt; voor vloeibare (gesmolten) zwavel is zij 0,234, voor phosphorus 0,2045, tin 0,0637, lood 0,0402, bismuth 0,0363. Men ziet dus, dat de soortelijke warmte in den vloeibaren staat aanzienlijker is, dan wanneer de ligchamen vast zijn.

196. **Betrekking tusschen de soortelijke warmte en de scheikundige aequivalenten.** — Dulong en Petit hebben bij hunne bovengemelde onderzoekingen eene merkwaardige betrekking ontdekt tusschen de soortelijke warmte van verschillende enkelvoudige stoffen en hare aequivalent-getallen. Zij hebben namelijk gevonden, dat de soortelijke warmte omgekeerd evenredig is aan de atoomgewigten, wanneer men te-

vens daarbij acht geeft op de eigenschap van sommige stoffen, dat hunne aequivalent-getallen het dubbel zijn der atoomgewigten (zie bladz. 32). Het product Pc, dat men verkrijgt door de soortelijke warmte c te vermenigvuldigen met het atoomgewigt P, moet dus voor onderscheidene enkelvoudige stoffen gelijk zijn. Men vindt uit de voorgaande tafel en de hierboven (25) opgegevene aequivalent-getallen de volgende waarden van Pc:

Zwavel	3,24.	Tin.	3,30.
Phosphorus . . .	6,04.	Antimonium. . .	6,55.
IJzer	3,19.	Kwikzilver . . .	3,33.
Kobalt.	3,15.	Goud	6,37.
Zink	3,10.	Platina	3,20.
Koper	3,02.	Lood	3,25.
Zilver	6,16.	Bismuth	6,56.

Men ziet, dat deze waarden vrij goed overeenstemmen, wanneer men namelijk in aanmerking neemt, dat de scheikunde leert, dat de aequivalent-getallen van phosphorus, antimonium, goud en bismuth het dubbel zijn van hunne atoomgewigten. Voor zilver is hetzelfde nog wel niet uit de scheikundige eigenschappen gebleken; maar de gevondene waarde voor de soortelijke warmte maakt het zeer waarschijnlijk, dat ook bij dit metaal het atoomgewigt niet door het aequivalent-getal, maar door zijne helft wordt voorgesteld. De afwijking tusschen de waarden van Pc, die afwisselen tusschen 3,02 en 3,33, moet volgens Regnault waarschijnlijk daaraan worden toegeschreven, dat de soortelijke warmte niet voor alle stoffen bepaald is op gelijken afstand van hun smeltpunt.

Regnault heeft zijne onderzoekingen ook uitgestrekt tot zamengestelde ligchamen, en bevonden, dat ook bij deze de soortelijke warmte omgekeerd evenredig is aan de atoomgewigten, wanneer men ten minste ligchamen vergelijkt, die door eene gelijke scheikundige formule worden aangeduid. Bij metaalmengsels vond hij, dat de soortelijke warmte de gemiddelde is van die der metalen, waaruit zij zijn zamengesteld, mits men niet te digt bij het smeltpunt komt.

197. **Soortelijke warmte van gassen.** — Delaroche en Bérard (1813) zijn de eersten geweest, die door naauwkeurige proeven de soortelijke warmte van sommige gassen bepaald hebben. Zij verwarmden het gas in een vat, dat door warm water omgeven was, en lieten het daarna door eene spiraalvormige buis gaan, die zich in een vat met koud water bevond. Daardoor verloor het gas een gedeelte van zijne warmte, terwijl de temperatuur van het koude water klom. Hoe meer gas van eene bepaalde temperatuur er noodig

was, om de temperatuur van het water een zeker aantal graden te verhoogen, des te geringer moest de soortelijke warmte van het gas zijn. Het spreekt wel van zelf, dat de warmtegraad van het gas, voor dat het door de spiraalbuis ging, en nadat het daardoor gegaan was, naauwkeurig moest waargenomen worden. Later hebben De la Rive en Marcet (1835), Suerman (1836), als ook Regnault (1853) op eene andere wijze de soortelijke warmte van gassen bepaald; de uitkomsten der onderzoekingen van den laatstgenoemden zijn in de volgende tabel opgenomen.

NAMEN DER GASSEN.	SOORTELIJKE WARMTE.	
	IN GEWIGT.	IN VOLUME.
Lucht	0,2377	0,2377
Zuurstofgas	0,2182	0,2412
Stikstofgas	0,2440	0,2370
Waterstofgas	3,4046	0,2356
Koolzuurgas	0,2164	0,3308
Ammoniakgas	0,5080	0,3031
Ligt koolwaterstofgas	0,5929	0,3318
Zwaar koolwaterstofgas	0,3694	0,3626
Kooloxydgas	0,2479	0,2372
Zwavelwaterstofgas	0,2423	0,2886
Chloorwaterstofgas	0,1845	0,2302
Zwaveligzuurgas	0,1553	0,3469
Chloorgas	0,1214	0,2999
Waterdamp	0,4750	0,2950
Alcoholdamp	0,4513	0,7171
Etherdamp	0,4810	1,2296

Uit de eerste kolom blijkt, dat behalve waterstofgas alle gassen en dampen geringere soortelijke warmte hebben dan water, wanneer men namelijk gelijke gewigten vergelijkt. Om een pond lucht 1° in temperatuur te doen rijzen zijn 0,2377 warmte-eenheden noodig, dat is, nagenoeg een vierde van de warmte, die vereischt wordt om een pond water 1° te doen rijzen. De getallen in de tweede kolom stellen ons in staat, om de soortelijke warmte van gelijke volumen van verschillende gassen en dampen onderling te vergelijken; zij zijn uit die in de eerste kolom afgeleid door vermenigvuldiging met de

soortelijke gewigten, zooals die op bladz. 177 zijn opgegeven (1). Het volume, dat hier als eenheid is aangewezen, is dat van een pond lucht bij 0°C en 76 duim drukking, dus 773,03 kubieke palmen. Wil men dus weten, hoeveel warmte-eenheden er noodig zijn, om 1 kan van een gas, dat eene temperatuur van 0° heeft en aan eene drukking van 76 duim is blootgesteld, 1° in temperatuur te verhoogen, dan moeten de getallen in de tweede kolom nog door 773,03 gedeeld worden, of wat hetzelfde is, met 0,0012936, het soortelijk gewigt van lucht (water = 1), vermenigvuldigd worden. Men ziet voorts uit deze getallen, dat de soortelijke warmte van gelijke volumen der onderscheidene gassen slechts weinig verschilt; vooral voor lucht en de beide gassen, waaruit deze bestaat, is het verschil zeer gering.

198. **Soortelijke warmte van gassen bij standvastige drukking, en bij standvastig volume.** — Wanneer een gas verwarmd wordt, zet het zich uit; dit heeft ten gevolge, dat òf het volume toeneemt, òf, zoo dit niet kan geschieden, de drukking grooter wordt. Bij de proefnemingen, die tot de boven vermelde uitkomsten geleid hebben, konden de gassen zich steeds uitzetten, terwijl hunne drukking gelijk bleef aan die van de lucht. Daarom duiden dan ook de getallen, die in de eerste kolom van de tabel voorkomen, de *soortelijke warmte bij standvastige drukking en veranderlijk volume* uit.

Zijn daarentegen de omstandigheden zoodanig, dat het volume van het gas bij toenemende warmte niet grooter kan worden, en dat dus de drukking in dezelfde mate toeneemt, dan kan de soortelijke warmte niet dezelfde wezen. Men zal ligt inzien, dat wanneer een gas zich niet kan uitzetten, het gemakkelijker kan verwarmd worden, dan indien het zich over eene grootere ruimte verspreidt; in het eerste geval toch blijven de moleculen digter bij elkander. De soortelijke warmte bij *standvastig volume en veranderlijke drukking* moet dus geringer zijn, dan die bij *standvastige drukking en veranderlijk volume.* De betrekking tusschen die beide heeft men getracht door proefneming te vinden. Clément en Désormes (1819) hebben te dien einde getracht de vermeerdering van warmte te bepalen, die wordt waargenomen, wanneer men een gas, dat zich heeft uitgezet, plotseling tot zijn oorspronkelijk volume terugbrengt. Uit hunne onderzoekingen, alsmede uit die van Dulong (1829) en Masson, heeft men afgeleid, dat de verhouding tusschen de soortelijke warmte bij standvastige drukking en die bij standvastig volume voor alle gassen nagenoeg dezelfde is, en dat, zoo men

(1) Sommige der getallen in de tweede kolom wijken eenigzins af van die, welke Regnault heeft medegedeeld, daar hij voor de digtheid van enkele gassen andere waarden heeft genomen dan de op bladz. 177 opgegevene.

de eerste door c de tweede door c' uitdrukt, men zal hebben $\frac{c}{c'} = 1{,}408$. Hieruit volgt dus dat, zoo men om een zeker volume lucht 1° te verwarmen éénе warmte-eenheid noodig heeft, wanneer men aan de lucht geene gelegenheid geeft om zich uit te zetten, voor gelijke verwarming van hetzelfde volume lucht 1,408 warmte-eenheden noodig zullen zijn, indien zij zich vrij kan uitzetten.

Wij zullen op dit verschijnsel nader terugkomen, als wij over de warmtebronnen en de mechanische theorie der warmte spreken.

F. VERANDERING VAN DEN AGGREGATIE-TOESTAND DOOR DE WARMTE.

199. **Smelten van vaste ligchamen.** — Bij de behandeling van de uitzetting door de warmte is ons reeds gebleken, dat de moleculen der ligchamen zich daarbij van elkander verwijderen. Die verwijdering moet eene vermindering in zamenhang ten gevolge hebben. Bij toeneming der warmte zal deze zoover gaan, dat een vast ligchaam vloeibaar wordt, en dat een vloeibaar ligchaam tot den gasvormigen toestand overgaat. De overgang van een vast ligchaam tot eene vloeistof is het verschijnsel, dat algemeen onder den naam van *smelten* bekend is.

Niet alle vaste ligchamen verkeeren nogtans in dit geval; bij sommige, vooral bij vele organische, heeft eene scheikundige ontleding plaats; ook bij eenige zouten wordt deze waargenomen. Wat de overige, en wel in de eerste plaats de enkelvoudige stoffen aangaat, zoo heeft men reden om ze alle voor smeltbaar te houden; koolstof zelfs, die vroeger steeds voor onsmeltbaar gehouden werd, is door de werking van den electrischen stroom door Despretz (1849), zoo al niet vloeibaar, dan toch week gemaakt.

De bij de smelting waargenomene verschijnselen zijn niet bij alle stoffen dezelfde; sommige worden eerst week en dan vloeibaar; andere daarentegen gaan onmiddellijk van den vasten tot den vloeibaren toestand over. Elke stof heeft haar eigen smeltpunt, dat is, zij begint bij eene vaste temperatuur te smelten, die niet toeneemt, zoolang niet de geheele massa vloeibaar is geworden, hoe aanzienlijk ook de aangebragte warmte zij. Het smeltpunt van de meest voorkomende stoffen is in de volgende tabel opgegeven.

Kwikzilver	— 40° C.	Kaarsevet	33° C.
Terpentijn	— 10.	Phosphorus	44.
IJs	0.	Stearine	55.

Potassium	58° C.	Zink	422° C.
Witte was.	68.	Antimonium.	433.
Sodium	90.	Brons	900.
Zwavel	115.	Zilver.	1000.
Tin	235.	Goud	1250.
Bismuth.	260.	Staal	1400.
Lood.	322.	IJzer	1500(1).

De temperaturen hooger dan 500°C zijn door Pouillet door middel van een luchtpyrometer bepaald. Platina komt niet onder de opgegevene metalen voor, daar de temperatuur waarbij het smelt nog niet naauwkeurig is bepaald; zij is echter hooger dan eene der opgegevene. Vroeger had men het niet anders dan door middel van een electrischen stroom tot smelten kunnen brengen; onlangs echter is het aan Sainte-Claire Deville gelukt het te smelten in een bijzonder daartoe ingerigten oven. Een geschikt middel tot smelten is ook de vlam van waterstof en zuurstof, waarvan wij boven (27 B) reeds melding hebben gemaakt.

Nog verdient opmerking, dat metaalmengsels meestal bij eene veel lagere temperatuur smelten dan de metalen, waaruit zij zijn zamengesteld, elk op zich zelf. Een mengsel van 4 deelen bismuth, 1 deel lood en 1 deel tin, bekend onder den naam van het metaalmengsel van d'Arcet, smelt reeds bij eene temperatuur van 94°. Ook het gewone soldeersel, waarvan de blikslager zich bedient, en dat uit 2 deelen lood en 1 deel tin is zamengesteld, smelt bij eene temperatuur, die lager is dan het smeltpunt van lood of tin afzonderlijk.

200. **Gebonden warmte.** — Een zeer merkwaardig verschijnsel bij de smelting is het reeds vermelde, dat namelijk, hoe groot ook de warmte is, de temperatuur standvastig blijft, zoolang de geheele massa niet vloeibaar geworden is. Het is dus duidelijk, dat deze warmte gebruikt wordt om het vaste ligchaam tot den vloeibaren staat te doen overgaan; en daar zij zich niet aan den thermometer of op eene dergelijke wijze laat waarnemen, zoo geeft men haar den naam van verborgen of *latente* warmte, of nog meer dien van *gebonden* warmte. Hieruit volgt dus, dat een ligchaam niet van den vasten tot den vloeibaren staat kan overgaan, zonder dat er warmte gebonden wordt.

Men kan zich hiervan door de volgende proef overtuigen. Men neemt een pond sneeuw of fijngestampt ijs van 0° en eën pond water van 79°, en mengt die schielijk dooreen op eene plaats, waar de temperatuur weinig van 0° verschilt; het ijs of de sneeuw zal smelten, maar de temperatuur van het mengsel zal

(1) Zoogenaamd wit gegoten ijzer smelt bij 1050° C, grijs ijzer bij 1200°C, gehamerd ijzer bij 1600°.

tot 0° dalen. Mengt men daarentegen een pond water van 0° met een pond water van 79°, dan heeft het mengsel eene temperatuur van 39°,5, namelijk het gemiddelde van 0° en 79°. Het is dus blijkbaar, dat in het eerste geval al de meerdere warmte van een pond water van 79° gediend heeft om een pond *ijs* van 0° te maken tot *water* van 0°. Om een pond water van 0° tot 79° te brengen zijn 79 warmte-eenheden noodig; gelijke hoeveelheid warmte wordt dus vereischt om een pond ijs te doen smelten. Het getal 79 stelt dus de gebonden warmte van water voor.

Black (1775) is de eerste geweest die heeft waargenomen, dat bij het smelten van ijs warmte gebonden wordt. Zijne onderzoekingen zijn later naauwkeuriger voortgezet door Lavoisier en Laplace (1780), de la Provostaye en Desains (1843), Regnault (1843) en Person (1849). Laatstgenoemde heeft zijne onderzoekingen ook uitgestrekt tot andere stoffen; deze hebben hem geleid tot eene merkwaardige betrekking tusschen de gebonden warmte, de temperatuur van het smeltpunt en de soortelijke warmte van de stof, zoowel in den vasten als in den vloeibaren toestand. Duidt t het smeltpunt aan, C de soortelijke warmte in den vloeibaren en c die in den vasten toestand, dan wordt de gebondene warmte l uitgedrukt door de formule $l = (160 + t)\ (C - c)$. Uit zijne proeven heeft hij afgeleid, dat de gebonden warmte van phosphorus 5,03, van zwavel 9,37 is, welke waarden zeer wel overeenkomen met die, welke men afleidt uit de boven gegevene waarden van t, C en c. Voor de gebonden warmte van tin vond hij 14,25, van bismuth 12,64, van lood 5,37, van zink 28,13, van zilver 21,07. Deze waarden komen minder overeen met die, welke men volgens de formule berekent, hetgeen door Person daaraan wordt toegeschreven, dat gesmolten metalen nog zeer onvolkomen vloeibaar zijn.

201. **Smelting door oplossing.** — Sommige vaste ligchamen kunnen tot den vloeibaren staat overgaan zonder dat zij verwarmd worden, namelijk door oplossing, zooals wij vroeger (20) reeds hebben vermeld. Wij moeten echter daarbij uitdrukkelijk het geval onderscheiden, dat er zich eene scheikundige verbinding vormt, en dat, waar slechts eene oplossing plaats heeft. In het eerste geval zal doorgaans warmte ontstaan, zooals wij later zullen zien; in het andere echter zal men eene vermindering van temperatuur waarnemen. De reden hiervan is ligt in te zien; de vaste stof heeft warmte noodig om tot den vloeibaren staat over te gaan en ontneemt die aan de vloeistof, die als oplossingsmiddel gebezigd wordt. Het duidelijkste kan men dit bemerken, wanneer men salpeterzure ammonia in water oplost; de temperatuur daalt dan ongeveer 20 graden; voegt men er wat chloorammonium (salmiak) bij, dan is de daling nog aanzienlijker.

Men maakt van deze eigenschap gebruik om zoogenaamde koudmakende mengsels zamen te stellen. Zoo doet bijv. een mengsel van 8 deelen zwavelzure soda met 5 deelen zoutzuur de temperatuur van 10° tot — 17° dalen; 2 deelen sneeuw of fijngestampt ijs met 1 deel keukenzout geven eene koude van — 18°, welke nagenoeg met het nulpunt van de schaal van Fahrenheit overeenkomt; 6 deelen zwavelzure soda, 5 deelen salpeterzure ammonia en 4 deelen verdund salpeterzuur geven eene koude van — 26°; door 1 deel sneeuw met 1 deel verdund zwavelzuur te vermengen kan men eene koude van — 50° verkrijgen.

202. **Vastworden van vloeistoffen.** — Even als men een vast ligchaam kan doen smelten door het te verwarmen, zoo zal men ook een vloeibaar ligchaam tot den vasten staat kunnen brengen door er warmte aan te ontnemen. De overgang van den vloeibaren tot den vasten toestand heeft plaats bij dezelfde temperatuur, waarbij het smelt, en daar de warmte, die bij het smelten gebonden werd, dan weder vrij moet worden, zoo zal de temperatuur niet kunnen afnemen, zoolang nog niet de geheele vloeibare massa weder vast geworden is. Daarom zal het vastworden ook slechts langzaam voortgaan, daar er steeds warmte vrij wordt, naarmate een gedeelte van den vloeibaren tot den vasten staat overgaat. Dit zal dus langzamer geschieden, naarmate de gebonden warmte grooter is; daar deze voor water zeer aanzienlijk is, bevriest het slechts langzaam.

Hoewel het vastworden van vloeistoffen steeds bij eene bepaalde temperatuur plaats heeft, zoo kunnen zij toch onder sommige omstandigheden ook bij eene lagere temperatuur vloeibaar blijven. Daartoe is het noodig haar in volmaakte rust te laten en zooveel mogelijk aan de aanraking met de lucht te onttrekken. Water kan op die wijze zelfs tot eene temperatuur van — 12° gebragt worden zonder te bevriezen. De minste beweging is echter dan voldoende om het vast te doen worden. Men neemt dan tevens waar, dat de temperatuur terstond tot 0° klimt, hetgeen het gevolg is van het vrijworden der gebonden warmte.

Niet alle vloeistoffen heeft men tot nog toe tot den vasten toestand kunnen doen overgaan; onder andere is dit het geval met zuiveren alcohol. Alleen door het aanbrengen van eene buitengewoon groote koude heeft Despretz dien eenigzins dik kunnen maken.

Wanneer zich uit eene verzadigde oplossing kristallen afzetten, dan moet er eveneens warmte vrij worden. Daar de kristallisatie echter doorgaans zeer langzaam plaats heeft, neemt men de daarbij vrijgewordene warmte niet waar. Men kan echter de kristallisatie door zekere voorzorgen beletten, om ze

daarna plotseling over de geheele vochtmassa te doen plaats hebben. Neemt men bijv. eene verzadigde warme oplossing van zwavelzure soda, en vult men daarmede eene flesch, die men terstond sluit, dan zal de kristallisatie bij de bekoeling niet plaats hebben; opent men echter later de flesch, zoodat de lucht daar binnen kan dringen, dan zullen zich terstond eene menigte kristallen in de vloeistof vormen. Heeft men de voorzorg gebruikt van er terstond een thermometer in te plaatsen, dan kan men aan dezen waarnemen, dat de temperatuur aanzienlijk rijst. Men kan de proef ook doen, door de warme oplossing in een cilinderglas te schenken en dit met eene blaas te sluiten. Is de oplossing koud geworden, dan zal het voldoende zijn een klein gaatje in de blaas te prikken om de kristallisatie te doen plaats hebben. De daarbij vrijwordende warmte bemerkt men reeds, als men de hand aan het glas houdt. Men kan ook de afscheiding der vloeistof van de buitenlucht bewerkstelligen door er, terwijl zij nog warm is, een weinig olie op te schenken; in dit geval is het echter noodig door een buisje een weinig lucht in de daaronder staande vloeistof te blazen, om haar tot kristallisatie te doen overgaan.

203. **Verandering van volume bij den overgang van den vloeibaren tot den vasten toestand.** — Bij de meeste stoffen heeft eene vermindering van volume plaats, wanneer zij van den vloeibaren toestand tot den vasten overgaan. Bij enkele echter wordt het tegenovergestelde waargenomen; hiertoe behooren ijzer, bismuth, antimonium en vooral water. Wanneer dit bevriest bedraagt de uitzetting ongeveer $\frac{1}{10}$; de kracht, die daarbij ontwikkeld wordt, is zoo aanzienlijk, dat niet alleen, zoo als wij 's winters meermalen waarnemen, glazen flesschen barsten, maar dat zelfs metalen vaten, die met water gevuld zijn, bij het bevriezen met geweld van een springen.

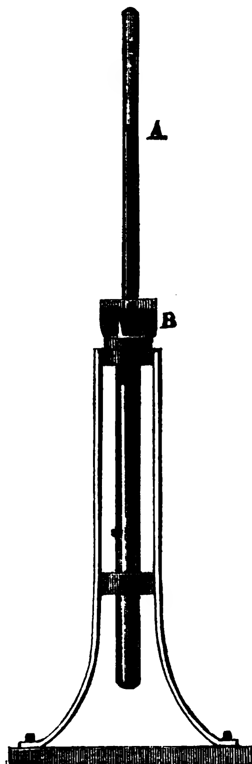
Door de aanzienlijke uitzetting van ijs is zijn soortelijk gewigt veel geringer dan dat van water; het bedraagt slechts 0,918. Van daar dat het altijd op het water drijft. Evenzoo ziet men op gesmolten ijzer, bismuth of antimonium de nog ongesmolten stukken drijven.

204. **Dampen.** — De meeste vloeistoffen kunnen tot den gasvormigen toestand overgaan en vormen dan dampen. De overgang van den vloeibaren tot den gasvormigen staat kan echter op verschillende wijzen plaats hebben. De dampen vormen zich aan de oppervlakte van de vloeistof, en in dat geval duidt men het verschijnsel aan door den naam *verdamping*; of wel zij ontstaan overal in de geheele massa der vloeistof, in welk geval men zegt, dat zij *kookt*. Terwijl het laatste in den regel niet kan geschieden zonder dat er van buiten warmte wordt aangebragt, heeft de gewone verdamping bij elke temperatuur

plaats. Eene in een open vat geplaatste vloeistof zal langzamerhand verminderen tengevolge van den overgang van de zich aan de oppervlakte bevindende deeltjes tot den gasvormigen toestand; hoe grooter deze oppervlakte is, des te schielijker zal de verdamping plaats hebben; een weinig vocht, als een dun laagje op een vast ligchaam uitgespreid, zal binnen veel korter tijd in damp overgaan, dan wanneer dezelfde hoeveelheid in een diep buisje verzameld is.

Even als de vaste ligchamen warmte noodig hebben om tot den vloeibaren staat over te gaan, zoo is ook voor vloeistoffen warmte noodig om te verdampen. Zij ontleenen die aan de massa der vloeistof zelve en aan de omringende ligchamen; bij de gewone langzame verdamping is echter bij vele ligchamen het verlies in warmte te gering om te kunnen worden waargenomen; bij enkele, zoo als ether, alcohol en dergelijke, die gemakkelijk in dampen overgaan bij de gewone temperatuur, is het, zooals wij later zien zullen, zeer merkbaar.

Fig. 191.



Enkele vaste ligchamen gaan tot dampen over zonder eerst vloeibaar te worden. Dit verschijnsel wordt waargenomen bij kamfer, iodium, arsenicum, alsmede bij ijs.

205. **Dampvorming in het luchtledige.** — Neemt men den in fig. 191 voorgestelden toestel, een dergelijken als waarvan wij ons bediend hebben om de wet van Mariotte (94) aan te toonen, en vullen wij de buis, alvorens haar om te keeren, met kwikzilver, dan verkrijgen wij daarin boven het kwikzilver eene luchtledige ruimte. Brengt men voorts door middel van eene pipet een paar druppels water of alcohol binnen in de buis, dan ziet men aanstonds het kwikzilver in de buis zakken. In de luchtledige ruimte heeft zich oogenblikkelijk damp gevormd, die eene zekere spanning heeft, zoodat deze, gevoegd bij de kwikkolom AB, die daarna nog in de buis blijft, evenwigt maakt met de luchtdrukking. De spanning van den damp is dus gelijk aan het verschil tusschen de hoogte van eenen gewonen barometer en die van de kwikkolom AB.

206. Onderscheid tusschen gassen en dampen; maximum van spanning. — Is de hoeveelheid vloeistof, die men in de buis gebragt heeft, slechts gering, dan zal zij geheel in damp zijn overgegaan. Ligt men de buis dan een weinig op, dan zal men zien, dat ook het kwikzilver klimt, maar niet evenveel, als men de buis heeft opgeligt. De kwikkolom is grooter geworden, en de spanning van den damp, die zich over eene grootere ruimte heeft kunnen verspreiden, is dus verminderd. In dit opzigt komen de dampen geheel met de gassen overeen. Heeft men echter meer vloeistof in de buis gebragt, zoodat zij niet geheel is verdampt, maar dat boven op de kwikkolom nog een vochtkolommetje is blijven rusten, dan zal bij het opligten dor buis de hoogte der kwikkolom steeds dezelfde blijven, terwijl de vermindering van het zich daarboven bevindend vocht aanduidt, dat zich meer damp vormt. Drukt men de buis weder naar beneden, dan blijft de kwikkolom ook even hoog en de damp gaat weder gedeeltelijk tot eene vloeistof over. Blijft men doordrukken, tot dat het gedeelte buis, dat boven de oppervlakte van het kwikzilver bij B is, niet grooter is dan de kwikkolom AB, dan zal alle damp weder tot den vloeibaren toestand terugkeeren.

Uit deze proeven, het eerst door Dalton (1805) genomen, volgt de volgende door hem bekend gemaakte wet: in het luchtledige geschiedt de dampvorming oogenblikkelijk, en de daardoor ontstane damp bereikt terstond een *maximum van spanning*, die niet door vermindering van volume of door zamendrukking kan vermeerderd worden. De ruimte, waarin zich in dat geval de damp bevindt, is dus *verzadigd* met damp, behalve in het geval dat er niet genoeg vloeistof aanwezig is, om de noodige hoeveelheid damp voor die ruimte te geven.

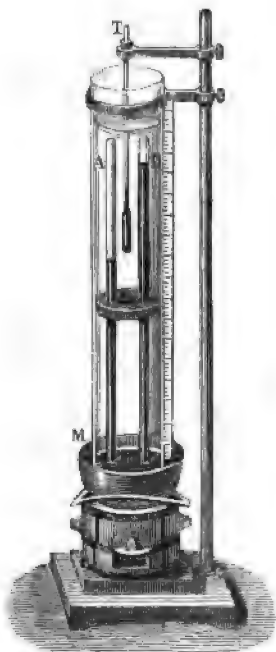
Fig. 192.



Het maximum van spanning is niet voor alle dampen hetzelfde. Om dit aan te toonen kan men gebruik maken van den in fig. 192 afgebeelden toestel, bestaande uit vier barometerbuizen, die in een kwikbakje rusten; in de buizen B, C en D heeft men boven het kwikzilver een weinig water, alcohol en ether gebragt, terwijl de eerste A boven het kwikzilver geen vocht bevat. Heeft men zorg gedragen, dat zich in elke buis eene voldoende hoeveelheid vocht bevindt om de dampen hun maximum van spanning te doen be-

reiken, hetgeen blijkt aan het vochtkolommetje, dat zich in dat geval nog boven het kwikzilver moet bevinden, dan zal men bemerken, dat de kwikkolommen zeer in hoogte verschillen. Bij het water in B is het verschil tusschen de kwikkolom en den barometerstand in A slechts gering, bij den alcohol in C is het grooter, en bij den ether in D nog veel aanzienlijker.

Fig. 193.



Er is behalve den aard van het vocht nog eene andere oorzaak, die op het maximum van spanning eenen grooten invloed uitoefent, namelijk de temperatuur van den damp. Dit kan men aantoonen met behulp van den in fig 193 afgebeelden toestel, waarvan ook Dalton zich bediend heeft om de spanning bij verschillende temperaturen te bepalen. Twee barometerbuizen A en B worden in een kwikbakje M geplaatst. In A bevindt zich damp, in B niets dan kwikzilver. Een van onderen en van boven geopende glazen cilinder wordt in het bakje geplaatst, zoodanig dat de onderkant beneden de oppervlakte van het kwikzilver komt. In dien cilinder wordt zooveel water geschonken, dat de beide barometerbuizen geheel daarmede omgeven zijn. Verwarmt men nu het kwikzilver in het bakje, dan deelt de warmte zich aan het water mede, en dus ook aan den damp in de barometerbuis A. Naarmate de temperatuur hooger wordt, ziet men het kwikzilver in de buis A dalen; de spanning neemt dus met de temperatuur toe. Wordt de spanning gelijk aan ééne atmospheer, dan zal het kwikzilver in de buis A even hoog staan als in het bakje M, op een gering verschil na, dat door de waterkolom veroorzaakt wordt. Voor grootere spanningen kan men zich niet meer van dezen toestel bedienen, maar gebruikt men den in fig. 194 afgebeelden, welke bestaat uit eene omgebogene aan het eene

Fig. 194.



uiteinde A gesloten en met kwikzilver gevulde glazen buis, waarin zich bij AB de damp bevindt. De spanning van dezen maakt evenwigt met de luchtdrukking, vermeerderd met de kwikkolom CD, die zich in den open arm van de buis bevindt. Dompelt men deze buis in eene vloeistof, waarvan men de temperatuur heeft waargenomen, dan zal men gemakkelijk de spanning van den damp bij die temperatuur kunnen bepalen.

207. **Bepaling van de spankracht van dampen bij verschillende warmtegraden.** — Dalton heeft door middel van de beschrevene toestellen de spanning van waterdamp bij verschillende temperaturen bepaald. Daar evenwel zijne methode geene zeer naauwkeurige resultaten konde opleveren, voornamelijk omdat het onmogelijk is de geheele watermassa in den glazen cilinder (Fig. 193) op eene zelfde temperatuur te houden, hebben Dulong en Arago (1830) en later Regnault (1844) deze onderzoekingen herhaald. Die van de beide eerstgenoemden hebben zich bepaald tot spanningen, hooger dan éėne atmospheer; Regnault heeft zoowel voor hoogere als voor geringere drukkingen de temperatuur van den waterdamp bepaald. De uitkomsten zijner onderzoekingen zijn gedeeltelijk bevat in de twee volgende tabellen, waarvan de eerste de spankracht aanwijst voor temperaturen beneden 100°, terwijl de laatste de temperatuur aanduidt van waterdamp, die eene aanzienlijker spanning dan éėne atmospheer heeft.

SPANNING VAN WATERDAMP VAN 0° TOT 100°C.

Temperatuur.	Spanning van waterdamp in strepen kwikzilver bij 0°.	Temperatuur.	Spanning van waterdamp in strepen kwikzilver bij 0°.	Temperatuur.	Spanning van waterdamp in strepen kwikzilver bij 0°.	Temperatuur.	Spanning van waterdamp in strepen kwikzilver bij 0°.
— 32°	0,310	4°	6,097	44°	67,790	82°	384,435
— 30	0,365	8	8,017	48	83,204	84	416,298
— 28	0,431	12	10,457	52	101,543	86	450,344
— 24	0,602	16	13,536	56	123,244	88	486,687
— 20	0,841	20	17,391	60	148,791	90	525,450
— 16	1,179	24	22,184	64	178,714	92	566,757
— 12	1,656	28	28,101	68	213,596	94	610,740
— 8	2,327	32	35,359	72	254,073	96	657,535
— 4	3,271	36	44,201	76	300,838	98	707,280
0	4,600	40	54,906	80	354,643	100	760,000

SPANNING VAN WATERDAMP VAN 100° TOT 230°,9 C.

Spanning van waterdamp uitgedrukt in atmospheren.	Temperatuur.	Spanning van waterdamp uitgedrukt in atmospheren.	Temperatuur.	Spanning van waterdamp uitgedrukt in atmospheren.	Temperatuur.	Spanning van waterdamp uitgedrukt in atmospheren.	Temperatuur.
1	100°,0	8	170°,8	15	198°,8	22	217°,9
2	120 ,6	9	175 ,8	16	201 ,9	23	220 ,3
3	133 ,9	10	180 ,3	17	204 ,9	24	222 ,5
4	144 ,0	11	184 ,5	18	207 ,7	25	224 ,7
5	152 ,2	12	188 ,4	19	210 ,4	26	226 ,8
6	159 ,2	13	192 ,1	20	213 ,0	27	228 ,9
7	165 ,3	14	195 ,5	21	215 ,5	28	230 ,9

Uit deze tabellen blijkt duidelijk, dat de spanning van waterdamp in veel sterkere mate toeneemt dan de temperatuur. De wet van toename is echter niet bekend.

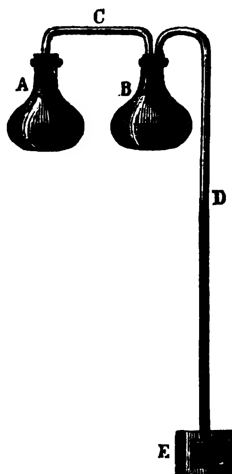
Regnault heeft in 1854 ook de spankracht van andere dampen dan waterdamp bij verschillende temperaturen bepaald. Voor alcohol en ether vond hij de volgende drukkingen.

Temperatuur.	Spanning in strepen kwikzilver van den damp van		Temperatuur.	Spanning in strepen kwikzilver van den damp van	
	Alcohol.	Ether.		Alcohol.	Ether.
— 20°	3,3	69,2	50°	220,3	1208,0
— 10	6,5	113,2	60	350,0	1730,3
0	12,7	182,3	70	539,2	2309,5
+ 10	24,1	286,5	80	812,8	2947,2
20	44,0	434,8	90	1190,4	3899,0
30	78,4	637,0	100	1685,0	4920,4
40	134,1	913,6	110	2351,8	6249,0

208. **Spanning van dampen in twee met elkander gemeenschap hebbende doch ongelijk verwarmde vaten.** — Bij het voorgaande zijn wij steeds uitgegaan van de onderstelling, dat de temperatuur over de geheele ruimte, waarin zich de dampen bevonden, dezelfde was. Doch

ook dan, wanneer deze ruimte niet overal evenzeer verwarmd is, kan toch de spanning in hare verschillende gedeelten niet verschillend zijn, daar alsdan geen evenwigt mogelijk zou wezen. De vraag doet zich dus voor, welke de spanding der dampen in zoodanige ongelijk verhitte ruimte zijn moet. Daar evenwel in de koudere deelen terstond een gedeelte van den damp, die van de warmere deelen komt, gecondenseerd wordt, zoo is het duidelijk, dat in den evenwigtstoestand de spanning over de geheele ruimte gelijk moet zijn aan die, welke in de minst verwarmde gedeelten moet plaats hebben. Men kan zulks duidelijk maken door de volgende proef. A en B (Fig. 195) zijn twee glazen kolfjes, beide half met water gevuld en door de buis C met elkander gemeenschap hebbende; aan B is bovendien eene lange omgebogene glazen buis D bevestigd, die in een kwikbakje E gedompeld kan worden. Men verwarmt het water in de kolfjes, en plaatst daarna de buis in het kwikbakje. Na weinige oogenblikken zal ten gevolge van het bekoelen van het water en den damp in de kolfjes de spanning geringer zijn geworden dan die van de buitenlucht, en zal dus het kwikzilver een weinig in de buis D geklommen zijn. Dompelt men nu het kolfje A in een bak met koud water of met een koudmakend mengsel, dan zal terstond het kwikzilver in de buis D aanmerkelijk stijgen; daaruit blijkt dus, dat door de sterke afkoeling niet alleen in A maar ook in B de spanning eene veel aanzienlijker vermindering heeft ondergaan, en dat dus in het laatstgenoemde kolfje, hoewel het niet onmiddelijk werd afgekoeld, de spanning is afgenomen en de damp dus gedeeltelijk moet gecondenseerd zijn.

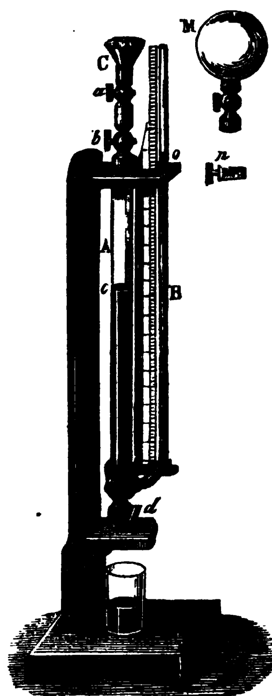
Fig. 195.



209. **Vermenging van dampen en gassen.** — Terwijl de verdamping, zoo als wij gezien hebben, in het luchtledige plotseling plaats heeft, geschiedt zij daarentegen slechts langzaam, wanneer de vloeistof met de lucht in aanraking is; in het eerste geval houdt zij geheel op, wanneer de damp eene zekere spanning verkregen heeft, in het tweede daarentegen blijft zij voortduren, niettegenstaande de drukking, door de lucht op de oppervlakte der vloeistof uitgeoefend, veel aanzienlijker is dan die, welke door de spanning der dampen in het eerste geval veroorzaakt is; is de vloeistof slechts met eene bepaalde hoeveelheid lucht, in eene bepaalde ruimte besloten, in aanraking,

dan zal de verdamping, zooals wij weldra zien zullen, zoo lang voortduren, tot die ruimte met damp verzadigd is. Hieruit volgt dus, dat de lucht minder den overgang van den vloeibaren tot den gasvormigen toestand tegenhoudt, dan dampen zulks doen. De reden van dit verschijnsel moet gezocht worden in de vroeger (116) reeds vermelde eigenschap, dat gassen zich zeer schielijk onderling kunnen vermengen. De damp vormt zich dan wel langzamer dan in het luchtledige, maar kan toch even goed de geheele ruimte verzadigen, alsof zij luchtledig was. Van daar dan ook, dat de verdamping schielijker geschiedt, wanneer de lucht droog is, dan wanneer zij reeds dampen bevat; hoe meer dus door beweging der lucht telkens nieuwe luchtdeeltjes met de oppervlakte in aanraking komen, des te schielijker zal het vocht in damp overgaan. Dit verschijnsel is iedereen uit het dagelijks leven genoegzaam bekend. Het droogen van natte stoffen berust geheel op dit beginsel; hoe meer telkens nieuwe drooge lucht wordt aangevoerd, des te schielijker zal het vocht, dat aan de stoffen hangt, verdampen.

Fig. 196.



Dalton (1801) is het eerst tot het besluit gekomen, dat de spanning van den damp, waarmede eene reeds met lucht of een ander gas gevulde ruimte verzadigd is, dezelfde is, als wanneer die ruimte geen lucht of gas bevat. Gay-Lussac (1807) heeft proefondervindelijk de juistheid dezer wetten aangetoond door middel van den in fig. 196 afgebeelden toestel. Deze bestaat uit twee glazen buizen A en B, die van onderen gemeenschap met elkander hebben, en waarvan de eerste met twee kranen *b* en *d* voorzien is. De buis A wordt geheel met kwikzilver gevuld, zoodat zich daarin geene lucht bevindt; daarna wordt op die buis de ballon M bevestigd, die met drooge lucht of met een ander gas gevuld is. Opent men dan de kraan *b*, dan zal het kwikzilver in A dalen, en in B klimmen; men laat dan door de kraan *d* zooveel kwikzilver uit, tot het in beide buizen even hoog staat, en teekent naauwkeurig aan de verdeelde schaal het punt *c* aan, waar het

kwikzilver blijft staan. Vervolgens vervangt men, na de kraan *b* gesloten te hebben, den bol M door den trechter C, waarin zich eene vloeistof bevindt. Door de kraan *a* om te draaijen, die niet geheel doorboord is, zooals bij *n* is voorgesteld, brengt men in de met lucht gevulde ruimte van A eene kleine hoeveelheid vocht, die daar in damp overgaat en het kwikzilver bij *c* doet dalen. Dit zet men zoolang voort, tot er bij *c* een weinig vloeistof onverdampt overblijft en de kwikkolom niet meer daalt, waaruit blijkt dat de ruimte met damp verzadigd is. Daarna schenkt men in buis B zoo lang kwikzilver bij, tot het in A weder bij het punt *c* staat. Het verschil in hoogte tusschen de beide kolommen in A en B zal dan de spanning van den damp aanduiden. Bepaalt men tevens deze spanning in het luchtledige op de hierboven (206) aangeduide wijze, en wel bij denzelfden warmtegraad, dan zal men bevinden, dat beide even groot zijn. De tegenwoordigheid van de lucht of van eenig ander permanent gas heeft dus op de spanning van den damp geen invloed uitgeoefend. Het bijvoegen van kwik in de buis B, om de ruimte in A weder tot hare vorige uitgebreidheid terug te brengen, is noodig ten einde de lucht, die zich bij het dalen van de kwikkolom over eene grootere uitgebreidheid had uitgestrekt, weder tot haar vorig volume en dus ook tot hare vorige spanning terug te brengen. Hieruit blijkt tevens, dat de spanning van het mengsel gelijk is aan de som der spanningen van de lucht en van den damp, wanneer namelijk de eerste weder tot haar oorspronkelijk volume is teruggebragt.

Regnault (1845) heeft de proeven van Gay-Lussac langs een anderen weg herhaald. Daaruit is gebleken, dat de spanning van waterdamp in lucht of in stikstof iets geringer is, dan in het luchtledige; het verschil is echter zoo gering, dat men zich in de praktijk geheel aan de wet van Dalton houden kan.

De hoeveelheid damp, die noodig is om eene zekere ruimte, hetzij die ledig of met gas gevuld is, te verzadigen, is des te aanzienlijker, naarmate de temperatuur hooger is. Men kan zich hiervan overtuigen door zoodanige met damp verzadigde ruimte schielijk af te koelen, in welk geval de damp weder gedeeltelijk tot den vloeibaren staat zal overgaan, en zich in den vorm van kleine druppels tegen de wanden zal aanzetten. Hetzelfde zal het geval zijn als de damp uit eene warmere in eene koudere ruimte overgaat; zij behoudt dan den vorm van damp niet meer, maar neemt dien van nevel of wasem aan. Wij bemerken dit dagelijks aan den zoogenaamden damp, die uit de tuit van een ketel met kokend water of uit de pijp van eene locomotief komt, alsook aan onzen adem, wanneer wij ons in de koude bevinden. Daarbij moet echter niet uit het oog verloren worden, dat hetgeen men ziet eigenlijk geen damp meer is; waterdamp is even als lucht onzigtbaar, zooals men zich kan over-

tuigen, wanneer men hem met kracht door eene kleine opening laat ontwijken; digt bij de opening neemt men hem niet waar, maar eerst dan, als hij een oogenblik in de lucht geweest is, wordt hij zigtbaar.

De langzame verdamping aan de oppervlakte van de zee, rivieren en andere watermassa's, alsmede van alle vochtige aan de lucht blootgestelde voorwerpen, is de oorzaak van de gedurige aanwezigheid van waterdamp in den dampkring. Komen die dampen in hoogere en koudere luchtlagen, dan vormen zij den nevel en de wolken, die later weder in de gedaante van regen tot water overgaan.

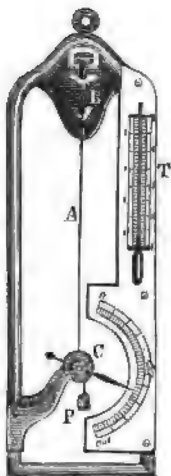
210. **Vochtigheidstoestand der lucht.** — Uit het voorgaande blijkt, dat er altijd waterdampen in den dampkring aanwezig zijn. Om zich daarvan te overtuigen is het voldoende een glas met een koudmakend mengsel in de open lucht te plaatsen; de waterdampen zullen zich terstond aan de oppervlakte condenseren. Het is dikwijls van belang de hoeveelheid dampen, die zich in den dampkring bevinden, te kunnen bepalen. De vochtigheidstoestand der lucht hangt echter niet af van de volstrekte hoeveelheid der daarin bevatte dampen, maar van de meerdere of mindere nabijheid tot het punt, waarbij zij verzadigd is. Dit punt hangt naauw te zamen met de temperatuur, en hieruit volgt dus, dat het noodig is tevens deze te kennen. Des zomers bevat de lucht veel meer dampen dan 's winters, en toch is haar vochtigheidstoestand in den zomer doorgaans geringer, omdat hij veel verder van het punt van verzadiging verwijderd is. Verwarmt men een vertrek, dan vermindert wel de vochtigheidstoestand der daarin bevatte lucht, omdat bij de hoogere temperatuur meer damp vereischt wordt om eene bepaalde ruimte te verzadigen, maar de volstrekte hoeveelheid vocht zal geene verandering ondergaan. Men drukt doorgaans den vochtigheidstoestand uit door de verhouding tusschen de hoeveelheid damp, die inderdaad in eene zekere ruimte aanwezig is, en die, welke er bij dezelfde temperatuur in zoude zijn, indien zij verzadigd was. Daar nu de dampen, zoo lang zij niet tot het punt van verzadiging gekomen zijn, de wet van Mariotte volgen, zoo moeten bij gelijke temperatuur en gelijk volume de hoeveelheden of de gewigten der dampen evenredig zijn aan de drukkingen, of wat hetzelfde is, aan de spanningen dier dampen zelven. De bovengemelde verhouding tusschen de hoeveelheden damp kan dus vervangen worden door de verhouding tusschen de daarmede overeenkomende spanningen, en de vochtigheidstoestand kan dus ook uitgedrukt worden door de verhouding tusschen de spanning van den damp in den dampkring, en de spanning welke die damp zoude hebben, indien de lucht bij dezelfde temperatuur er mede verzadigd was.

De werktuigen, die dienen om den vochtigheidstoestand van den dampkring te bepalen, noemt men *hygrometers* of *vochtigheidsmeters*. Dienen zij alleen om

veranderingen aan te wijzen, zonder op den wezenlijken toestand acht te geven, dan noemt men ze *hygroskopen*. Wij zullen de voornaamste hygrometers beschouwen te gelijk met de beginselen, waarop hunne werking berust.

211. **Hygrometer van de Saussure.** — Sommige organische stoffen, zooals haren, darmsnaren, blaas en dergelijke, hebben de eigenschap van in te krimpen door droogte en uit te rekken door vochtigheid. De haar-hygrometer van de Saussure (1783) berust op dit beginsel. Hij bestaat uit een haar A (Fig. 197), dat bij B bevestigd en bij C om een rolletje geslagen is, terwijl aan zijn uiteinde zich een gewigtje P bevindt, waardoor het eenigzins gespannen gehouden wordt. Op dit rolletje bevindt zich een wijzer, die zich dus zal bewegen, wanneer ten gevolge van verandering in den vochtigheidstoestand der lucht het haar zich zamentrekt of langer wordt. Tegelijk met de getallen, op den verdeelden cirkelboog door den wijzer aangewezen, moet ook de temperatuur aan den thermometer T waargenomen worden, en uit deze wordt dan met behulp van daartoe berekende tafels de vochtigheidstoestand van de lucht bepaald.

Fig. 197.



De haar-hygrometers kunnen niet als op den duur naauwkeurig beschouwd worden; het haar wordt langzamerhand langer door het gewigtje, waardoor het gespannen gehouden wordt, en verliest zijne hygroskopische eigenschappen. Ook zijn verschillende hygrometers moeijelijk onderling te vergelijken, daar niet alle haren gelijksoortig en even hygroskopisch zijn.

212. **Hygrometer van Daniell.** — Eene tweede soort van hygrometers dient om te bepalen, tot welke temperatuur de lucht moet worden afgekoeld, opdat de daarin aanwezige damp voldoende zoude zijn om haar te verzadigen. Bij eene nog aanzienlijker afkoeling moet de damp gecondenseerd worden; men neemt daarom de temperatuur waar, bij welke deze condensatie plaats heeft, en deze, of eigenlijk eene weinig hoogere, zal de gezochte zijn. Het quotient van het maximum van spanning bij die temperatuur en van dat bij de temperatuur der lucht zal dan den vochtigheidstoestand aanwijzen.

De hygrometer van Daniell (1820), welke op dit beginsel berust, is in fig. 198 afgebeeld. Hij bestaat uit twee door eene glazen buis vereenigde glazen bollen

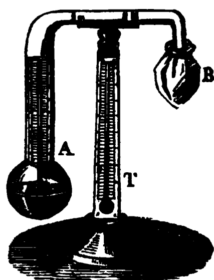


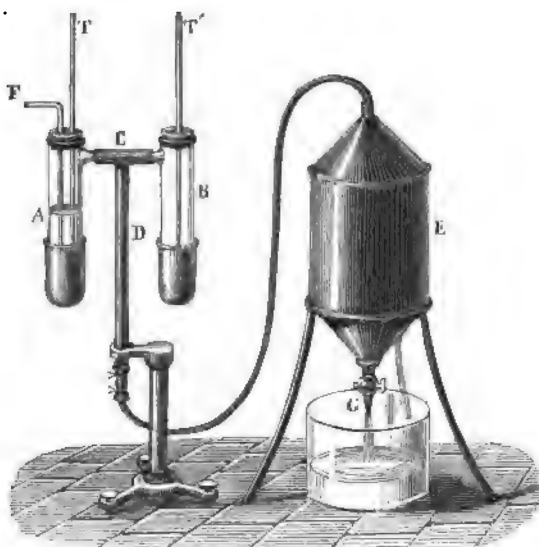
Fig. 198.

A en B, waarvan de eerste half vol ether is en een thermometer bevat, wiens bol in den ether gedompeld is De toestel is volkomen vrij van lucht, zoodat er niets anders dan etherdampen in kunnen aanwezig zijn. Het bolletje B is omwonden met dun neteldoek, waarop men druppelsgewijze ether schenkt. Door de verdamping van dezen ether koelt het bolletje af, en de daarin bevatte etherdampen worden gecondenseerd. De ether in A levert echter nieuwe dampen, die weder in B gecondenseerd worden. Door de verdamping in A wordt echter dit bolletje ook afgekoeld; de lucht, die het omgeeft, wordt ook kouder, en zal weldra tot eene temperatuur dalen, waarbij de daarin bevatte waterdamp haar verzadigt, en dus bij de geringste vermindering van temperatuur aan de oppervlakte van het bolletje A gecondenseerd wordt. Zoodra dit geschiedt, neemt men de temperatuur op den thermometer in A waar; daar deze echter iets te laag is, neemt men ook die waar, bij welke de gecondenseerde dampen weder van A verdwijnen; van deze beide neemt men het gemiddelde. Zooals reeds gezegd is, men vindt den vochtigheidstoestand door het maximum van spanning voor waterdamp bij deze temperatuur (welke spanning inderdaad dezelfde is als die van de in de lucht aanwezige waterdampen), te deelen door het maximum van spanning bij de temperatuur der lucht, die door den thermometer T wordt aangewezen.

Hoewel de hygrometer van Daniell naauwkeuriger uitkomsten geeft dan die van de Saussure, zoo kan hij toch ook niet als volkomen juist beschouwd worden. De in het bolletje met ether opgesloten thermometer wijst de temperatuur aan van den ether, waarin hij gedompeld is, terwijl de temperatuur, waarbij de waterdampen gecondenseerd worden, alleen daar heerscht, waar de verdamping plaats heeft, dat is aan de oppervlakte van de vloeistof. Bij groote droogte en hooge temperatuur zijn de aanwijzingen zeer onnaauwkeurig; zij worden bovendien onjuist gemaakt door de nabijheid van den waarnemer, waardoor de vochtigheidstoestand van de lucht eene wijziging ondergaat.

213. **Hygrometer van Regnault.** — Regnault heeft getracht de bezwaren van den hygrometer van Daniell weg te nemen door de in fig. 199 afgebeelde inrigting. Twee even groote glaasjes A en B zijn verbonden door eene gedeeltelijk holle metalen buis C, waaraan een zijdelingsch stuk D verbonden is, door welk A gemeenschap heeft met een aspirator E De beide glaasjes A en B zijn van onderen met dun zilverblik beslagen; in beide zijn door

Fig. 199.



middel van kurken thermometers bevestigd. Door de kurk van het buisje A is tevens een dun glazen buisje F gestoken, dat nagenoeg tot op den bodem reikt. Het buisje A wordt half vol zwavelether geschonken, en de kraan G van den aspirator geopend. Uit dezen vloeit dan water uit, en de buitenlucht dringt dus door het buisje F binnen. De luchtbellen gaan door den ether heen en doen hem gedeeltelijk verdampen; daar tot die verdamping warmte noodig is, neemt de temperatuur van de vloeistof af. Na verloop van eenige oogenblikken vertoont zich aan de oppervlakte van het zilver waterdamp in den vorm van dauw; de temperatuur, waarbij dit geschiedt, wordt aan den thermometer T waargenomen. De temperatuur van de buitenlucht wordt aangewezen door den thermometer T′ in B; opdat deze aanwijzing naauwkeurig zij, is het echter noodig, dat er geene gemeenschap tusschen A en B bestaat, en dat het gedeelte van de buis C regts van D dus gesloten is. De berekening van den vochtigheidstoestand geschiedt even als bij den hygrometer van Daniell.

214. **Psychrometer van August.** — Leslie en later Gay-Lussac hebben eenen anderen weg aangewezen om den vochtigheidstoestand te bepalen; zij wilden namelijk dien afleiden uit de meerdere of mindere snelheid, waarmede water verdampt. August (1825) heeft dit denkbeeld verwezenlijkt door een werktuig, dat hij *psychrometer* genoemd heeft, en dat eenvoudig bestaat uit twee volkomen gelijk wijzende thermometers, waarvan de bol van den eenen met een lapje neteldoek omwonden is, dat met water bevochtigd wordt. Dit water zal verdampen; opdat dit kan geschieden is warmte noodig, welke dus

aan den bol van den thermometer ontnomen wordt. Deze thermometer zal dus dalen, en weldra eene bepaalde temperatuur aanwijzen. Uit deze en de door den droogen thermometer aangewezene kan men de spanning der in de lucht aanwezige dampen berekenen. August heeft daarvoor tafels ingerigt, die echter niet volkomen naauwkeurig zijn, dewijl zij berusten op de vroeger gebruikelijke en minder juiste waarden van de soortelijke warmte van lucht en van waterdamp, alsmede van de digtheid en gebonden warmte van den laatstgenoemden. Gebruikt men de daarvoor later door Regnault gevonden waarden, dan heeft men voor de spanning x van den damp de formule

$$x = f' - \frac{0,429\,(t-t')}{610 - t'}\,h,$$

waarin t de temperatuur van den droogen, t' die van den natten thermometerbol, h de luchtdrukking, door den barometer aangewezen, en f' het maximum van spanning bij de temperatuur t' van den natten thermometer voorstelt. Duidt f het maximum van spanning aan van den damp bij de temperatuur t, dan zal de vochtigheidstoestand of, zoo als men het ook wel noemt, de betrekkelijke vochtigheid door $\frac{x}{f}$ worden aangewezen.

De psychrometers worden tegenwoordig het meest gebruikt om den vochtigheidstoestand der lucht te bepalen. De uitkomsten der waarnemingen zijn dan ook als vrij naauwkeurig te beschouwen.

215. **Koken.** — Wordt eene vloeistof in een open vat verwarmd, dan neemt aanstonds de dampvorming toe, althans aan de oppervlakte. Reeds bij geringe verhooging van den warmtegraad ziet men de in het water opgeloste lucht in den vorm van bellen opstijgen. Bij toenemende temperatuur worden de wanden zoo warm, dat ook de vochtdeeltjes, die daarmede in aanraking zijn, in damp overgaan. Zoodra de spanning van dien damp aanzienlijk genoeg is, om de drukking van de zich daarboven bevindende kolom water en van den dampkring te overwinnen, dan stijgt hij naar de hoogte; doch alvorens nog aan de oppervlakte gekomen te zijn, wordt hij weder gecondenseerd, dat is, hij gaat weder tot den vloeibaren toestand over, omdat de lagen, waarmede hij in aanraking komt, kouder zijn dan de vochtdeeltjes, die zich bij de wanden bevinden. Dat beurtelings ontstaan en condenseren van damp veroorzaakt het geluid, dat wij gewoon zijn het *zingen* te noemen. Eindelijk, wanneer de temperatuur nog vermeerdert, worden de spanning van den ontstanen damp en de warmtegraad van het water aanzienlijk genoeg, om de dampbellen tot aan de oppervlakte te doen komen; alsdan zegt men, dat de vloeistof *kookt*.

Elke vloeistof heeft eene vaste temperatuur, waarbij zij kookt; deze is echter afhankelijk van de drukking op de oppervlakte, alsook eenigzins van den aard van het vat. Zoolang evenwel het koken onder dezelfde drukking voortduurt, verandert de temperatuur niet, hoe groot ook de van buiten aangevoerde warmte zij. De oorzaak daarvan is, dat die warmte geheel gebonden wordt bij den overgang der vloeistof tot damp, zoodat eene sterkere verhitting wel de verdamping bevordert, maar de temperatuur niet doet rijzen.

Ziehier eene opgave van de temperatuur, bij welke de meest voorkomende vloeistoffen koken, onder eene drukking van 76 duim:

Zwaveligzuur	— 10° C.	Terpentijn.	157° C.
Zwavelether.	+ 37	Phosphorus	290
Alcohol	79	Zwavelzuur	325
Water	100	Kwikzilver	360 (1).

Deze getallen gelden slechts voor het geval, dat de vloeistoffen zuiver zijn. Zijn daarin andere stoffen opgelost, dan is het kookpunt hooger gelegen en wel des te hooger, naarmate er meer is opgelost. Eene verzadigde oplossing van keukenzout in water kookt bij 109°, van koolzure potassa eerst bij 135°, van salpeterzure kalk bij 151°. De temperatuur van den ontwijkenden waterdamp is echter dezelfde als die van kokend zuiver water.

Van eenigen, doch van minder grooten invloed is de aard van het vat. Uit de waarnemingen van Gay-Lussac (1818) is het duidelijk gebleken, dat water in een metalen vat bij eene lagere temperatuur kookt, dan in een glazen vat; voor het eerste vond hij 100°, voor het tweede 101°. Indien het vat vooraf met zwavelzuur was schoongemaakt, begon het water zelfs eerst bij 105° te koken. De oorzaak schijnt gezocht te moeten worden in de meerdere verwantschap van het glas voor het water, waardoor de dampen zich niet zoo gemakkelijk vormen. Daaraan moet het ook worden toegeschreven, dat het koken in een glazen vat meestal met schokken gepaard gaat, die men echter kan vermijden door in de vloeistof eenige kleine hoekige stukjes metaal te leggen, aan wier oppervlakte men dan terstond zich eene menigte dampbellen ziet vormen.

216. **Invloed van de drukking op het kookpunt.** — Wij hebben zoo even de opmerking gemaakt, dat, zoodra eene vloeistof begint te koken, de damp eene spanning heeft, die aanzienlijk genoeg is om tot aan de oppervlakte te komen en de luchtdrukking te overwinnen. Daaruit volgt dus, dat

(1) De hier opgegevene temperaturen zijn die, welke door eenen kwik-thermometer worden aangewezen. Gebruikt men de aanwijzingen van eenen lucht-thermometer, dan is het kookpunt van kwikzilver 350° C. (Zie bladz. 271.)

de spanning van damp bij het kookpunt juist gelijk moet zijn aan de luchtdrukking, wanneer de vloeistof namelijk in een open vat aan de lucht aan het koken wordt gebragt. De spanning van waterdamp bij 100° is dus juist eene atmospheer, die van etherdamp bij 37° eveneens, enz. Tevens kan men hieruit afleiden, dat bij eene geringere of grootere drukking het kookpunt ook lager of hooger moet gelegen zijn.

Dat bij geringere drukking eene vloeistof bij eene lagere temperatuur kookt, kan men gemakkelijk aantoonen. Een cilinderglas met warm water wordt onder de klok van de luchtpomp geplaatst. Pompt men een gedeelte der lucht daaruit, dan zal de drukking op de oppervlakte der vloeistof verminderen, en zoodra zij niet meer de spanning van den waterdamp bij de temperatuur van het water overtreft, zal dit beginnen te koken. Dit verschijnsel duurt echter slechts korten tijd, vooreerst omdat door de verdamping warmte aan het water onttrokken wordt, zoodat zijne temperatuur en dus ook de spanning der dampen afneemt, en voorts omdat de drukking op de vloeistof toeneemt ten gevolge van den waterdamp, die zich in de klok vormt. Pompt men op nieuw lucht (en waterdamp) uit, dan zal zij weder beginnen te koken. Men kan ook nog op de volgende eenvoudige wijze zich hiervan overtuigen. In een glazen kolfje brengt men water aan het koken; zoodra het goed kookt en men dus kan onderstellen, dat de ruimte in het kolfje boven de vloeistof slechts waterdamp bevat, sluit men het goed met eene kurk, en keert het daarna om in den in fig. 200 aangewezen stand. Na het eenigen tijd te hebben laten staan, zoodat het eèn weinig afgekoeld is, en dus de temperatuur beneden 100° is gedaald, schenkt men er koud water over; daardoor wordt de waterdamp, die zich in het kolfje bevindt, gedeeltelijk gecondenseerd; de drukking vermindert dus en het water begint te koken.

Fig. 200.



De betrekking tusschen de luchtdrukking en het kookpunt is oorzaak, dat het water op eene aanzienlijke hoogte, of bij lagen barometerstand, bij eene lagere temperatuur kookt. Op den Mont-Blanc bijv. op eene hoogte van meer dan 4700 ellen, waar de barometer slechts 42 duim aanwijst, moet het water reeds bij eene temperatuur van 84° koken, zooals is af te leiden uit de tabel op bladz. 292. Bij de bepaling van het kookpunt van eenen thermometer is het dus noodig op den barometerstand acht te geven; zoo deze niet juist 76 duim

bedraagt, moet men voor het verschil eene correctie aanbrengen. Men heeft zich ook van deze eigenschap bediend om een toestel te construeren, waarmede men de hoogte van bergen, enz. kan bepalen, even als met den barometer (93). Deze toestel bestaat uit een thermometer, aan welken men zoodanigen vorm gegeven heeft, dat alleen de graden tusschen 85° en 101° daarop worden aangewezen, maar zoo groot zijn, dat men met naauwkeurigheid kleine onderdeelen kan waarnemen. Deze thermometer wordt in een koperen bak geplaatst, waarin water verwarmd wordt; men neemt de temperatuur waar, bij welke het water kookt, en leidt daaruit de luchtdrukking af volgens de zoo even vermelde tabel. Daar die echter slechts van twee tot twee graden gaat, en het hier voornamelijk op onderdeelen van graden aankomt, heeft men te dien einde afzonderlijke tafels berekend, zoo als wij er hier eene laten volgen voor temperaturen tusschen 95° en 101°.

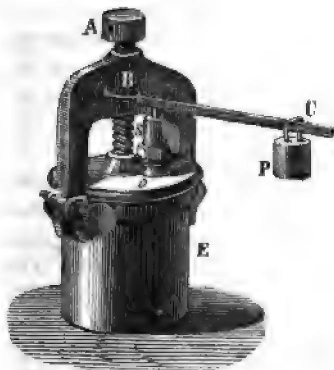
SPANNING VAN WATERDAMP IN STREPEN KWIKZILVER, BIJ EENE TEMPERATUUR VAN 95°—101° C.

Temperatuur.	Spanning van waterdamp.	Temperatuur.	Spanning van waterdamp.	Temperatuur.	Spanning van waterdamp.	Temperatuur.	Spanning van waterdamp.
95°,0	633,78	96°,5	669,69	98°,0	707,26	99°,5	746,50
1	636,12	6	672,14	1	709,82	6	749,18
2	638,47	7	674,60	2	712,39	7	751,87
3	640,83	8	677,07	3	714,97	8	754,57
4	643,19	9	679,55	4	717,56	9	757,28
95,5	645,57	97,0	682,03	98,5	720,15	100,0	760,00
6	647,95	1	684,52	6	722,75	1	762,73
7	650,34	2	687,02	7	725,35	2	765,46
8	652,73	3	689,53	8	727,96	3	768,20
9	655,13	4	692,04	9	730,58	4	771,95
96,0	657,54	97,5	694,56	99,0	733,21	100,5	773,71
1	659,95	6	697,08	1	735,85	6	776,48
2	662,37	7	699,61	2	738,50	7	779,26
3	664,80	8	702,15	3	741,16	8	782,04
4	667,24	9	704,70	4	743,83	9	784,83
						101,0	787,63

217. **Papiniaansche pot.** — Evenzeer als bij geringere drukking het kookpunt lager ligt, moet het bij meerdere drukking hooger liggen. Die meerdere drukking kan men te weeg brengen, door de vloeistof in een volmaakt gesloten vat sterk te verhitten; de gevormde damp, niet uit het vat kunnende ontsnappen, hoopt zich daarbinnen op; hij behoudt de verkregen warmte en oefent dus eene aanzienlijke drukking uit; het water zal dus niet kunnen koken, maar steeds in warmte toenemen. Maakt men eene kleine opening in het vat, dan zal de damp met geweld ontsnappen, en de temperatuur zal weldra weder tot 100° dalen. De temperatuur en daarbij behoorende spanning vindt men in de tabel op bladz. 293.

Papin (1681) heeft van deze eigenschap gebruik gemaakt om een toestel te vervaardigen, naar hem *Papiniaansche pot* genoemd, waarin het water tot eene zeer aanzienlijke temperatuur kan verhit worden. Deze bestaat uit een stevigen metalen pot E (Fig. 201), waarop het deksel door middel van eene schroef A stevig bevestigd wordt. Bij S bevindt zich eene klep, die van binnen kan worden opgeligt, doch door middel van den hefboom BC en het daaraan hangend gewigt P gesloten wordt gehouden, zoolang de drukking van binnen niet die van het gewigt P overtreft. In den pot wordt water gedaan, alsmede de stoffen, die men wil oplossen of aftrekken, zooals beenderen en dergelijke. Musschenbroek heeft de temperatuur van het water zoo hoog doen klimmen, dat tin daarin smolt. De spanning van den waterdamp was daarbij ongeveer 30 atmospheren.

Fig. 201.



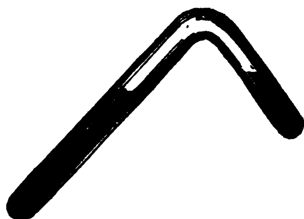
218. **Overgang van den gasvormigen tot den vloeibaren toestand.** — Wij hebben bij onderscheidene der tot dusverre vermelde proeven reeds gezien, dat dampen weder tot den vloeibaren toestand kunnen overgaan, hetzij door afkoeling, hetzij door zamenpersing, wanneer namelijk de ruimte met damp verzadigd is, en deze dus het maximum van spanning bereikt heeft.

Van het eerstgenoemde middel om dampen weder tot den vloeibaren toestand te doen overgaan wordt het meest gebruik gemaakt, onder anderen bij de destilleertoestellen. Deze bestaan uit een metalen of glazen vat, waarin de vloeistof

aan het koken wordt gebragt, en waaruit de damp, naarmate hij zich vormt, naar een ander vat gedreven wordt, dat sterk wordt afgekoeld door het in eene koude vloeistof te plaatsen. De damp wordt in dat vat gecondenseerd, terwijl de daarbij vrijwordende warmte wordt afgegeven aan de wanden, en van deze weder overgaat tot de koude vloeistof, waarin het geplaatst is; deze vloeistof moet dus gedurig door nieuwe vervangen worden. Men maakt van zoodanigen toestel gebruik, om eene vloeistof te zuiveren van daarin opgeloste stoffen. Heeft men bijv. onzuiver water in het vat gedaan, dan zal de waterdamp alleen zich naar het afgekoelde vat begeven en daar als zuiver water gecondenseerd worden, terwijl de opgeloste stoffen in het verwarmde vat achterblijven. Zijn in het vocht ook vlugtige zelfstandigheden bevat, dan gaan deze mede over, en het is dus niet mogelijk op deze wijze het water er van te bevrijden. Zoo gaat bijv. het in regenwater opgeloste koolzuurgas met den waterdamp over, en door het gecondenseerde water wordt het ook weder gedeeltelijk opgenomen. Heeft men een mengsel van twee stoffen, die bij ongelijke temperatuur koken, dan kan men ze door destillatie grootendeels van elkander scheiden. Wordt bijv. een mengsel van alcohol en water verwarmd, en draagt men zorg dat de temperatuur niet veel boven het kookpunt van alcohol stijgt, dan zullen de alcoholdampen in het andere vat overgaan en daar afgekoeld worden, terwijl slechts zeer weinig waterdamp wordt medegevoerd en gecondenseerd.

Door sterke afkoeling is men ook geslaagd enkele gassen, die bij de gewone temperatuur gasvormig zijn en daarom vroeger voor permamente gassen gehouden werden, tot den vloeibaren staat te doen overgaan. Vooral echter wordt die overgang door sterke zamenpersing bevorderd. Faraday (1823) heeft verschillende gassen in vloeistoffen doen overgaan in eene omgebogene glazen buis, zooals in fig. 202 is voorgesteld. In den langen arm bevinden zich de stoffen, waaruit zich bij verwarming het gas ontwikkelt; dompelt men tevens den korten arm in een koudmakend mengsel, dan zullen de dampen, zoowel tengevolge van de afkoeling als van hunne eigene drukking, vloeibaar worden en zich daar verzamelen. Uit zijne onderzoekingen en uit die van eenige andere natuurkundigen blijkt, dat zwaveligzuur vloeibaar wordt bij — 10° C., stikstofoxydul bij — 88°, beide onder de gewone luchtdrukking. Sommige kunnen zelfs in vaste ligchamen veranderd worden; vast koolzuur smelt bij — 58°, ammoniak bij — 75°, zwaveligzuur bij — 76°, zwavelwaterstof bij — 80°, stikstofoxydul bij — 100° C.

Fig. 202.

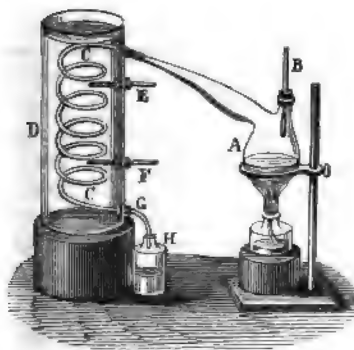


Voor het vloeibaar maken van sommige gassen, die slechts bij zeer lage temperaturen en eene drukking van verscheidene atmospheren vloeibaar worden, zijn door Thilorier (1835) en anderen meer zamengestelde toestellen uitgedacht, waarvan het gebruik echter niet zonder gevaar is.

De eenige gassen, welke men tot nog toe niet tot vloeistoffen heeft kunnen doen overgaan, hoewel men hen tot eene temperatuur van — 110° C heeft afgekoeld en sommige zelfs aan eene drukking van 50 atmospheren heeft blootgesteld, zijn zuurstof, waterstof, stikstof, kooloxyd en stikstofoxyd.

219. **Gebonden warmte van dampen.** — Reeds meermalen hebben wij op de vorige bladzijden de opmerking gemaakt, dat er warmte gebonden wordt, wanneer eene vloeistof tot damp overgaat; het is aan deze eigenschap toe te schrijven, dat, hoeveel warmte ook aangevoerd wordt, de temperatuur eener kokende en vrij aan de lucht verdampende vloeistof niet hooger dan het kookpunt kan gebragt worden. Evenzeer als bij dampvorming warmte gebonden wordt, moet ook bij condensatie van dampen tot vloeistof warmte vrij worden. De methode, waarvan men zich bedient om de hoeveelheid gebonden warmte te bepalen, berust geheel op de onderstelling, dat deze even groot is als die, welke bij de condensatie vrij wordt. Black (1775), Despretz (1823) en anderen hebben zich te dien einde bediend van den in fig. 203 afgebeelden toestel. In eene glazen retort A wordt water aan het koken gebragt; een daarin geplaatste thermometer B wijst de temperatuur der dampen aan. De damp gaat uit deze retort in eene metalen slang CC, welke in een vat met water D geplaatst is, waarvan de temperatuur door de thermometers E en F wordt aangewezen. De gecondenseerde vloeistof loopt bij G in eene flesch H. Zij nu P het gewigt van het water in het vat D, alsmede van de metalen slang tot water herleid (zie hierboven 192), t de temperatuur van dit water bij het begin, t' die bij het einde, T die van den damp, door den thermometer B aangewezen, p het gewigt van het in H verzamelde gecondenseerde water, dan zal, wanneer wij de soortelijke warmte van water als eenheid aannemen, de door den calorimeter D opgenomen warmte worden uitgedrukt door P $(t'-t)$; die, welke door het water in H is afgegeven, door p $(T-t')$. Het verschil van deze

Fig. 203.



beide is de warmte, welke bij de condensatie is vrijgeworden; deze wordt voorgesteld door px, wanneer namelijk x de gebonden warmte van den damp voorstelt, zoodat men zal hebben

$$px = P(t' - t) - p(T - t'),$$

waaruit men x kan berekenen.

Despretz heeft uit zijne waarnemingen de waarde 540 afgeleid; uit latere onderzoekingen, door Regnault met naauwkeuriger toestellen in het werk gesteld is gebleken, dat daarvoor 537 moet gesteld worden. Dit getal duidt dus aan, dat er 537 warmte-eenheden noodig zijn om een pond water van 100° te doen overgaan tot damp van gelijke temperatuur.

Watt was van meening dat de warmte, die noodig is om eene bepaalde hoeveelheid water van 0° af in damp te veranderen, altijd dezelfde is, en dat dus de som van de vrije warmte van waterdamp en zijne gebonden warmte altijd dezelfde is, namelijk 640. Regnault heeft echter aangetoond, dat zulks niet het geval is. Hij heeft op grond zijner waarnemingen voor de totale warmte l, dat is voor de gebonden warmte vermeerderd met de temperatuur t van den damp, de formule

$$l = 606{,}5 + 0{,}305\, t$$

gegeven. Daaruit blijkt, dat de gebonden warmte bij 0° 606,5 bedraagt, en dat deze voor hoogere temperaturen moet verminderd worden met het product der temperatuur met den standvastigen coëfficient 0,695. Het volgende tafeltje geeft zoowel de totale als de gebonden warmte van 0° tot 230°.

Tempera tuur.	Gebonden warmte.	Totale warmte.	Tempera-tuur.	Gebonden warmte.	Totale warmte.
0°	606,5	606,5	120°	522,3	643,1
10	599,5	609,5	130	515,1	646,1
20	592,6	612,6	140	508,0	649,2
30	585,6	615,6	150	501,4	652,2
40	578,7	618,7	160	493,6	655,3
50	571,7	621,7	170	486,3	658,3
60	564,7	624,8	180	479,0	661,4
70	557,6	627,8	190	471,6	664,4
80	550,6	630,9	200	464,3	667,5
90	543,5	633,9	210	456,8	670,5
100	536,5	637,0	220	449,4	673,6
110	529,4	640,0	230	441,7	676,6

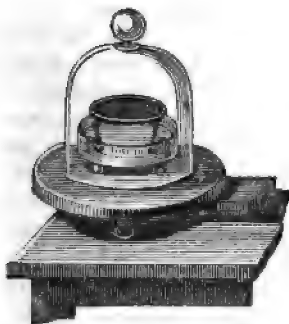
De tweede kolom wijst de hoeveelheid warmte aan, die noodig is om een pond water van de aangewezen temperatuur te maken tot damp van denzelfden warmtegraad; in de derde vindt men de geheele hoeveelheid warmte aangeduid, noodig om een pond water van 0° tot damp van de bedoelde temperatuur te doen overgaan.

Onlangs zijn door Favre en Silbermann nieuwe onderzoekingen in het werk gesteld zoowel aangaande de gebonden warmte van waterdamp, als van andere vloeistoffen. Zij vonden voor waterdamp 535,8, voor alcoholdamp 209, voor etherdamp 91.

220. **Koude veroorzaakt door verdamping.** — Wij hebben gezien, dat eene vloeistof eene aanzienlijke hoeveelheid warmte noodig heeft om te kunnen verdampen. Wordt die warmte niet op de eene of andere wijze van buiten aangevoerd, dan moet zij aan de ligchamen, waarmede de damp in aanraking is, ontnomen worden. Dit is een verschijnsel, dat iedereen door de ondervinding bekend is. Heeft men de hand met water bevochtigd en houdt men haar in den wind, dan gevoelt men koude; dit is alleen toe te schrijven aan de verdamping, welke door de beweging der lucht bevorderd wordt. Nog sterker gevoelt men de koude, als men eenige druppels alcohol of ether op de hand schenkt, omdat deze vloeistoffen veel schielijker verdampen.

Men kan van deze eigenschap gebruik maken, om eene aanmerkelijke koude te weeg te brengen. Onder de klok van eene luchtpomp plaatst men een schaaltje met zwavelzuur, en daarboven een metalen schaaltje met water, zooals in fig. 204 is voorgesteld. Pompt men nu de lucht uit, dan heeft de verdamping van het water schielijker plaats dan in de vrije lucht, terwijl zij bovendien nog bevorderd wordt door de eigenschap van het zwavelzuur om den waterdamp op te nemen; door de verdamping wordt zooveel warmte aan het water ontnomen, dat het weldra bevriest. Eveneens kan men water in een dun glazen buisje onder de luchtpomp doen bevriezen, wanneer men het omwikkeld heeft met watten, waarop men zwavelether heeft geschonken. Neemt men vloeibaar zwaveligzuur, dat, zoo als wij reeds gezien hebben, bij — 10° C kookt, en schenkt men daarin eenige druppels kwikzilver, dan zal men, zoo men dit onder de luchtpomp plaatst

Fig. 204.

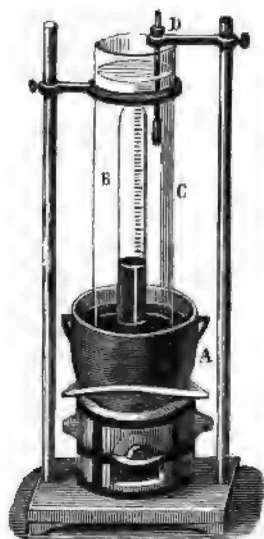


en de lucht zoo schielijk mogelijk uitpompt, het kwikzilver kunnen doen bevriezen, waartoe eene koude van — 40° C noodig is. De aanzienlijke koude van — 110°, waarvan wij boven (218) melding gemaakt hebben, is door Despretz teweeg gebragt door de verdamping van een mengsel van vloeibaar stikstofoxydul, vast koolzuur en zwavelether.

Somtijds gebruikt men poreuse aarden vaten, *alcarazas* genaamd, om de daarin bevatte vloeistoffen koel te houden. Door den poreusen wand zijpelt de vloeistof langzamerhand door; aan de buitenoppervlakte gekomen, verdampt zij en ontneemt de daartoe benoodigde warmte aan het vat en de daarin bevatte vloeistof. Zoo geeft ook het besprenkelen van den vloer in warme vertrekken koelte, omdat het water warmte noodig heeft om tot damp over te kunnen gaan.

221. **Digtheid der dampen.** — De methode, welke men gebruikt om het soortelijk gewigt van dampen te bepalen, is eene andere dan die, waarvan men zich bedient om de digtheid van gassen te bepalen. Terwijl bij gassen het gewigt van een bepaald volume onderzocht wordt, heeft daarentegen Gay-Lussac (1811) bij dampen het volume bepaald, dat eene zekere hoeveelheid vloeistof, als zij tot damp is overgegaan, onder eene bepaalde drukking inneemt. Hij bediende zich daartoe van den in fig. 205 afgebeelden toestel.

Fig. 205.

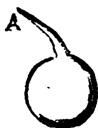


In een met kwikzilver gevulden ijzeren bak A wordt eene verdeelde glazen klok B geplaatst, die geheel met kwikzilver gevuld is. In deze klok brengt men een zeer dun en klein glazen bolletje van een bekend gewigt, waarvan men, na het met water gevuld te hebben, op nieuw het gewigt bepaalt om juist te weten, hoeveel water het inhoudt. Rondom de klok wordt een glazen cilinder C geplaatst met water, waarvan een thermometer D de temperatuur aanwijst. Wordt nu het kwikzilver in den bak A verwarmd, dan deelt de warmte zich mede aan het water in C en dus ook aan het glazen bolletje in de klok, dat door de uitzetting van het daarin bevatte water springt. Dit water gaat dan aanstonds tot damp over en het kwikzilver in de klok daalt, zooals in de figuur is aangewezen. Men kan

dan door middel van de verdeelingen der klok gemakkelijk het volume van den damp bepalen; de temperatuur wordt door den thermometer D aangewezen en de drukking door den stand van den barometer, verminderd met de kwikkolom in de klok, doch vermeerderd met de waterkolom in den cilinder C. Bij de berekening moet men echter op vele herleidingen acht geven, veroorzaakt door de uitzetting van het glas, van het kwikzilver en van het water.

Dumas (1832) heeft de digtheid van dampen bepaald, door in een glazen bol van den in fig. 206 aangewezen vorm een weinig van de vloeistof te verwarmen, die dan tot damp overgaat. De punt A wordt toegesmolten op het oogenblik, dat alle vloeistof in damp is overgegaan, en dat dus de ruimte in den ballon geheel met damp verzadigd is; nadat hij bekoeld is, wordt hij gewogen. Wanneer men vooraf het gewigt van den ballon, met lucht gevuld, heeft bepaald, alsmede, door hem met kwikzilver gevuld te wegen, zijn volume, dan zal men gemakkelijk de digtheid van den damp daaruit kunnen afleiden.

Fig. 206.



Uit de onderzoekingen van Gay-Lussac en van Dumas heeft men de volgende digtheden afgeleid voor de dampen bij het kookpunt der vloeistoffen; de digtheid van lucht is daarbij als eenheid aangenomen.

Waterdamp	0,6235	Terpentijndamp	3,013
Alcoholdamp	1,6138	Kwikzilverdamp	6,976
Etherdamp	2,5860	Jodiumdamp	8,716.

Het gewigt van een bepaald volume damp kan hieruit gemakkelijk worden afgeleid, wanneer men in aanmerking neemt, dat een kan lucht bij 0° en onder eene drukking van 76 duim 1,2936 wigtjes weegt. Om bijv. het gewigt van een kan waterdamp bij 100° te berekenen, moet men eerst het gewigt van een kan lucht bij 100° bepalen; daar de uitzettings-coëfficient van lucht 0,00366 is, zoo zal dat gewigt $\frac{1,2936}{1,366} = 0,9467$ wigtjes bedragen. Een kan waterdamp bij 100° weegt dus $0,9467 \times 0,6235 = 0,5902$ wigtjes. Een kan water zal dus $\frac{1000}{0,5902} = 1694,2$ kannen waterdamp van 100° geven. Waterdamp van die temperatuur is dus nagenoeg 1700 maal minder digt dan water.

222. **Spheroïdaal-toestand der vochten.** — Wanneer men op een gloeijend schaaltje van platina of zilver eenige druppels water laat vallen, dan

zal niet, zoo als men verwachten zoude, de geringe hoeveelheid water terstond zich over de oppervlakte verspreiden en tot damp overgaan, maar zij zal den vorm van een eenigzins afgeplat bolletje behouden, even als een kwikdruppel op eene glazen plaat, en op de gloeijende oppervlakte steeds in beweging blijven, doch niet aan het koken geraken. Dit merkwaardig verschijnsel, waarop Leidenfrost in 1756 een der eersten de aandacht vestigde, is sedert door verschillende natuurkundigen nader onderzocht, vooral sedert 1836 door Boutigny, die aan den toestand, waarin zich de vloeistof in het aangewezen geval bevindt, den naam van *spheroïdaal-toestand* gegeven heeft, omdat de druppel de gedaante van een afgeplatten bol of spheroïde heeft.

De zoo even vermelde proef laat zich gemakkelijk herhalen en veelvuldig wijzigen. Men kan verschillende vloeistoffen gebruiken, en ook schaaltjes of kroesjes van verschillende stoffen aanwenden, mits slechts de temperatuur hoog genoeg is. Boutigny heeft zelfs water, alcohol en ether in den spheroïdaal-toestand gebragt op de oppervlakte van zeer sterk verwarmd zwavelzuur.

De verdamping eener vloeistof in den spheroïdaal-toestand geschiedt zeer langzaam, hetgeen daaraan schijnt te moeten worden toegeschreven, dat er eigenlijk geene aanraking plaats heeft tusschen de vloeistof en de oppervlakte van het schaaltje. De temperatuur van het vocht is lager dan die van het kookpunt. Volgens Boutigny is deze voor water 96°,5, voor alcohol 75°,05, voor ether 34°,25, onverschillig welke de temperatuur van het schaaltje is. Neemt men de lamp, waardoor de schaal gloeijend gehouden wordt, weg, dan zal de temperatuur langzamerhand afnemen. Wanneer deze daalt tot 142°, dan kan het water niet langer in den spheroïdaal-toestand blijven; het verspreidt zich onder een knal over de oppervlakte van het schaaltje, waarmede het dan in aanraking komt, en door welks warmte het oogenblikkelijk aan het koken geraakt en in damp overgaat. Voor alcohol is de grens der temperatuur van het schaaltje bij 134°, voor ether bij 61° gelegen.

Onder de verschillende proeven van Boutigny verdient de volgende nog vermeld te worden. In een gloeijend platinakroesje schenkt men eenige druppels vloeibaar zwaveligzuur. Daar deze vloeistof reeds bij — 10° kookt, zal zij in het kroesje, waar zij den spheroïdaal-toestand aanneemt, steeds beneden die temperatuur blijven. Schenkt men er dan eenige druppels water in, dan zal dit bevriezen, en men heeft dus in een gloeijend kroesje ijs gemaakt. Op dergelijke wijze heeft Faraday kwikzilver doen bevriezen in een mengsel van ether en vast koolzuur, dat in een gloeijend kroesje in den spheroïdaal-toestand was gebragt, en waarschijnlijk eene temperatuur van — 100° had.

Het zijn niet alleen kleine vochtmassa's, die den spheroïdaal-toestand kunnen aannemen, ook grootere kunnen in dien toestand geraken. Men kan zich

daarvan gemakkelijk overtuigen door in eene groote gloeijende metalen kroes, wier binnenoppervlakte goed glad gepolijst is, eerst eene kleine hoeveelheid water te brengen, en deze langzamerhand te vermeerderen. Zij zal dan steeds beneden de temperatuur van het kookpunt blijven. Uit proeven van Perkins is duidelijk gebleken, dat ook in deze gevallen de vloeistof niet met de wanden in aanraking is. Laat men het vat afkoelen, dan zal, zoodra de temperatuur niet meer voldoende is om de vloeistof in den spheroïdaal-toestand te doen blijven, de aanraking plaats grijpen, en het grootste gedeelte der vloeistof met geweld er uitgeslingerd worden. Men heeft het springen van stoomketels wel daaraan willen toeschrijven, dat het water daarin in den spheroïdaaltoestand geraakte; door velen echter wordt dit in twijfel getrokken.

Omtrent de verklaring van deze verschijnselen heeft men het nog niet geheel eens kunnen worden. Het voorname verschijnsel is het gemis van aanraking tusschen de wanden van het vat en de vloeistof; maar waaraan is dat gemis toe te schrijven? De meesten zijn van meening, dat zich tusschen het vat en de vloeistof eene laag damp bevindt, welke de aanraking belet, en tevens den overgang van de warmte in de vloeistof moeijelijk maakt. Een gedeelte der warmte, die van de gloeijende oppervlakte uitstraalt, wordt door de oppervlakte van de vloeistof teruggekaatst, een ander gedeelte wordt door haar doorgelaten zonder geabsorbeerd te worden. De vloeistof zelve neemt dus slechts weinig warmte op, en daaraan meent men het te moeten toeschrijven, dat zij niet alleen niet aan het koken komt, maar dat ook de verdamping zeer langzaam plaats heeft. Een groot gedeelte der warmte wordt dus gebruikt om tusschen de oppervlakte van het vat en de vloeistof eene laag damp te houden, welke, gedurig ter zijde ontwijkende, steeds door nieuwen moet vervangen worden.

Boutigny neemt aan, dat er behalve de drie algemeen voorkomende aggregatie-toestanden een vierde is, namelijk de spheroïdaal-toestand; volgens hem zoude kwikzilver op eene houten, glazen of ijzeren oppervlakte, en water op een met vet besmeerd vlak, zich eveneens in dien toestand bevinden. Het is echter waarschijnlijk, dat wel, even als in die gevallen de cohaesie der moleculen grooter is dan de adhaesie aan de oppervlakte der stof, waarmede zij in aanraking zijn, ook in den spheroïdaal-toestand hetzelfde plaats heeft, doch dat alsdan de oorzaak enkel in de werking der warmte te zoeken is.

Sedert langen tijd was het eene bekende daadzaak, dat men de vochtige hand in een gesmolten metaal kan steken, zonder zich te branden. Boutigny heeft dit verklaard door den spheroïdaal-toestand. Het vocht, dat zich aan de oppervlakte der hand bevindt, is oorzaak, dat er geene eigenlijke aanraking plaats heeft tusschen de hand en het gesmolten metaal. Het spreekt wel van zelf, dat men de hand slechts een kort oogenblik in de vloeibare massa steken mag, daar er aanraking zal

plaats hebben, zoodra het vocht verdampt is. Op gelijke wijze kan men zonder zich te branden, de hand in kokend water dompelen, zoo men ze vooraf bevochtigd heeft met ether, die dan ook den spheroïdaal-toestand aanneemt.

223. **Spanning van waterdamp als beweegkracht.** — Wij zijn reeds meermalen in de gelegenheid geweest om opmerkzaam te maken op de aanzienlijke drukking, welke door waterdamp of stoom, vooral bij hooge temperatuur, wordt uitgeoefend op de wanden van het vat, waarin hij bevat is. Van die drukking heeft men reeds voorlang getracht gebruik te maken, om stoom als beweegkracht aan te wenden; de pogingen, aanvankelijk in 't werk gesteld om dit doel te bereiken door Salomon de Caus (1615), Branca (1629), den markies van Worcester (1663), Papin (1690—1707), Savery (1698) en anderen, leidden echter over het algemeen tot resultaten, die van gering praktisch belang waren.

Het eerste, dat uit dit oogpunt beschouwd voor belangrijk mag gehouden worden, was het zoogenaamde atmospherisch werktuig van Newcomen. Dit bestond uit eenen van boven geopenden cilinder, waarin zich een zuiger kon op en neer bewegen. Onder den zuiger werd uit een stoomketel de stoom geleid, die den zuiger naar boven dreef; was deze boven in den cilinder gekomen, dan werd de gemeenschap tusschen den ketel en den cilinder afgesloten, terwijl daarentegen de in laatstgenoemden aanwezige stoom door een straal koud water werd gecondenseerd. Daardoor werd de drukking van den stoom tegen den onderkant van den zuiger nagenoeg geheel weggenomen; de drukking van de buitenlucht op den bovenkant bleef echter bestaan, en was in staat om niet alleen den zuiger naar beneden te voeren, maar tevens door middel van een daaraan bevestigden hefboom eene aanzienlijke last op te ligten. Van deze werktuigen werd in het begin der voorgaande eeuw, en wordt zelfs nu nog op enkele plaatsen in Engeland gebruik gemaakt, om de pompen in beweging te brengen, waardoor het water uit de mijnen wordt verwijderd.

Hoewel het werktuig van Newcomen de vroegere pogingen om de spanning van stoom als beweegkracht aan te wenden verre overtrof, zoo had het toch nog vele gebreken, waardoor het slechts voor enkele doeleinden bruikbaar was. De Engelschman James Watt (1763 en volg.) was de eerste die aan deze nuttige toepassing der natuurwetten eene rigting wist te geven, welke gemaakt heeft, dat er thans bijkans geene kracht is, die meer als beweegkracht wordt gebruikt, dan de spankracht van den stoom. Wij zullen met voorbijgang van de vroegere pogingen, die thans als van minder belang kunnen beschouwd worden, ons bepalen tot de beschrijving van de inrigting, door hem aan de stoomwerktuigen gegeven.

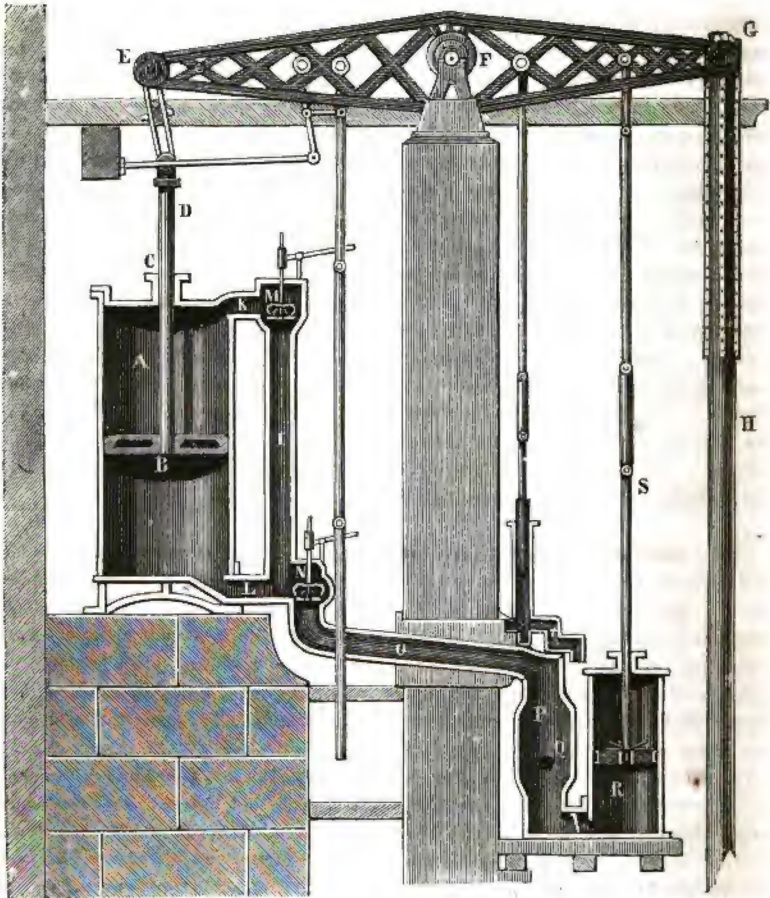
224. Condensor. — Eene groote zwarigheid bij het werktuig van Newcomen, evenals bij andere vóór of na hem uitgedachte, bestond daarin, dat de metalen cilinder, na door den stoom aanzienlijk verhit te zijn, terstond weder sterk werd afgekoeld door het water, dat tot condensatie van den stoom daarin werd gespoten. Bragt men dan weder op nieuw stoom in die koud geworden ruimte, dan werd die onmiddellijk gecondenseerd, en dit duurde zoolang voort, tot de wanden van den cilinder door de bij de condensatie van den waterdamp vrijgeworden warmte weder zoozeer verwarmd waren, dat de stoom daarin zijne spanning konde behouden; dan eerst kon de zuiger naar boven gedreven worden en aan de andere deelen van het werktuig zijne beweging mededeelen. Het laat zich ligt inzien, dat deze wijze van werken met een aanzienlijk verlies in tijd en in warmte moest gepaard gaan. Watt nu was de eerste, die door eene nieuwe inrigting deze zwarigheid wist te overwinnen. Het was hem namelijk bekend, dat, zooals wij hierboven (208) hebben aangetoond, de spanning van dampen in twee ongelijk verwarmde, doch onderling gemeenschap hebbende ruimten dezelfde moet zijn, en wel die, welke bij de laagste der daarin heerschende warmtegraden behoort. Hij deed daarom de condensatie niet plaats hebben door de ruimte zelve af te koelen, waarin zich de dampen bevonden, maar door die ruimte in gemeenschap te brengen met eene andere, die sterk werd afgekoeld. De condensatie had daardoor even goed plaats, maar de wanden van den cilinder, waarin zich de dampen bevonden, werden slechts weinig afgekoeld. Wij zullen bij de beschrijving der stoomwerktuigen zien, hoe deze afzonderlijke *condensor* doorgaans is ingerigt.

225. Stoomwerktuig van Watt van enkele werking. — Behalve door eene voordeeliger condensatie van den stoom in eenen afzonderlijken condensor, heeft Watt de stoomwerktuigen ook daardoor aanzienlijk verbeterd, dat hij niet de lucht op den bovenkant van den zuiger liet werken, zooals bij dat van Newcomen, maar den stoom in den van boven gesloten cilinder boven op den zuiger liet drukken. Zulks zal duidelijker worden door eene korte beschrijving van deze soort van werktuigen, doorgaans bekend onder den naam van *stoomwerktuigen van Watt van enkele werking.*

In eenen cilinder A (Fig. 207) kan zich een zuiger B op en neêr bewegen. De cilinder is van boven gesloten; alleen bevindt zich in het deksel bij C eene opening, waar de zuigerstang D juist kan doorgaan, zonder echter aan den stoom in den cilinder gelegenheid te geven om naar buiten te ontwijken, noch aan de buitenlucht om daar binnen te dringen. Deze stang is op eene wijze, die wij later zullen beschrijven, verbonden met den hefboom of balans EG, die om het vaste punt F draaijen kan, en aan wiens uiteinde G de zware stang

H vastgemaakt is, die met de pompen in de mijnen (waar deze soort van werktuigen het meest gebruikt worden) verbonden is. Terzijde van den cilinder is

Fig. 207.



eene holle kolom I geplaatst, die bij K en L met den cilinder gemeenschap

heeft. Boven aan deze kolom bevinden zich twee (1) kleppen, waarvan de eene M dient om den stoom uit den stoomketel in den cilinder bij K binnen te laten. De andere, die zich daar achter bevindt, en in de figuur daarom niet is kunnen voorgesteld worden, dient om gemeenschap daar te stellen of af te breken tusschen het gedeelte van den cilinder boven den zuiger B en de ruimte daaronder. Is die klep opgeligt, dan kan de stoom, die zich bovenin bij A bevindt, door de kolom I ook onder den zuiger komen; is zij daarentegen gesloten, dan moet de stoom in de bovenste ruimte blijven. Deze klep draagt den naam van *evenwigtsklep*. Onderaan bij N bevindt zich nog eene klep, welke dient om den stoom gelegenheid te geven door de buis O naar den condensor P te komen, waarin door eene opening Q koud water gespoten wordt. Dit water, zoowel als het door de condensatie van den stoom daarin gevormde, wordt verwijderd door middel van eene pomp R, welke door het stoomwerktuig zelf, door tusschenkomst van de stang S, wordt in beweging gebragt.

De werking laat zich gemakkelijk verklaren. Stellen wij, dat de zuiger B zich boven in den cilinder bevindt en dat de evenwigtsklep gesloten is, dan is er geene gemeenschap tusschen het bovenste gedeelte van den cilinder en de kolom I. Wordt nu de klep, waardoor de stoom kan binnen komen, of zoo als men ze gewoonlijk noemt, de *toelatingsklep* geopend, dan zal de zuiger B door de drukking van den stoom naar onderen gedreven worden; het uiteinde E van de balans gaat dan ook naar beneden, terwijl het andere uiteinde G met de daaraan verbonden stang H wordt opgeligt. Is de zuiger onder in den cilinder gekomen, dan wordt de toelatingsklep gesloten, alsmede de *uitlatingsklep* N, terwijl de evenwigtsklep geopend wordt. De stoom, die zich boven den zuiger bevindt, krijgt daardoor gelegenheid om door de kolom I en door L ook onder den zuiger te komen; daardoor wordt de drukking aan weêrszijden van dien zuiger gelijk, en de zuiger wordt door het gewigt van de zware stang H aan het andere uiteinde van de balans opgeligt, tot hij weder boven in den cilinder is gekomen. Het is deze opgaande beweging, welke eigenlijk het doel van het werktuig is, daar door de nederdaling van H en van de daarmede verbondene zuigers in de mijnpompen het mijnwater naar boven gedreven wordt. Wanneer de zuiger boven bij K is aangekomen, wordt de evenwigtsklep gesloten, terwijl de beide andere kleppen worden geopend. Door het openen van de klep N komt het benedenste gedeelte van den cilinder, dat nog vol stoom is, in gemeenschap met den condensor O; de stoom wordt daardoor terstond gecondenseerd, zoo al niet

(1) Eigenlijk drie, namelijk ook nog de zoogenaamde smoorklep; deze is hier echter kortheidshalve niet vermeld, omdat zij tot de verklaring van het stelsel van deze stoomwerktuigen niets afdoet.

volkomen, dan toch in zoo groote mate, dat hij slechts eene zeer geringe drukking tegen den onderkant van den zuiger kan uitoefenen; tevens drukt de nieuwe door de toelatingsklep boven dien zuiger komende stoom met kracht dezen naar beneden, en de stang H wordt weder opgeligt. Op die wijze gaat de werking geregeld voort, mits slechts gezorgd wordt, dat de kleppen ter geschikter tijd geopend en gesloten worden. Dit geschiedt bij deze werktuigen door middel van eenen vrij zamengestelden toestel, omtrent welken wij hier niet in bijzonderheden kunnen treden, en die eenvoudigheidshalve in de figuur niet, of althans slechts onvolkomen, is afgebeeld. (1)

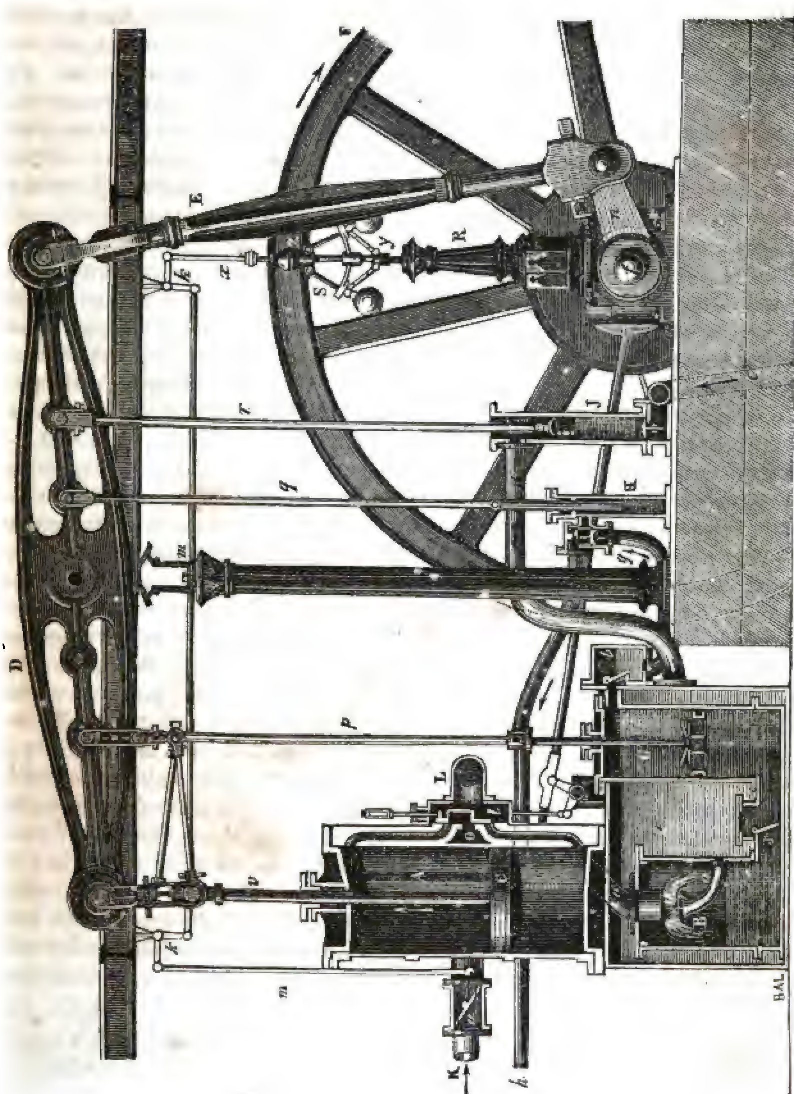
De stoomwerktuigen van enkele werking zijn hoofdzakelijk geschikt om voor het aangewezene doel gebruikt te worden, namelijk om de pompen in de mijnen in beweging te brengen. Tot dat einde worden zij nog veel gebruikt in Engeland, vooral bij de kolenmijnen in Cornwallis; van daar dat ze ook menigmaal onder den naam van stoomwerktuigen van Cornwallis worden aangeduid. Men zal echter ligtelijk inzien, dat zij, wat de bijzonderheden aangaat, voor vele wijzigingen vatbaar zijn; doch van welken aard deze ook zijn mogen, de aard der beweging is steeds dezelfde als hier in aangeduid.

226. **Stoomwerktuigen van Watt van dubbele werking.** — In de meeste gevallen, waarin men van den stoom als beweegkracht gebruik maakt, is het doel om aan eene as eene regelmatige ronddraaijende beweging te geven, die dan door middel van raderwerken, riemen zonder eind en dergelijke toestellen, op andere werktuigen kan worden overgebragt; hiertoe is echter blijkbaar een werktuig als het zoo even beschrevene niet geschikt. Watt is de eerste geweest, die ook zoodanige stoomwerktuigen heeft vervaardigd, waarin de stoom beurtelings boven en onder den zuiger werkt, en die, hoewel zij na hem nog verschillende verbeteringen hebben ondergaan, toch wat het beginsel aangaat dezelfde zijn gebleven.

In fig. 208 wordt een stoomwerktuig van dien aard voorgesteld. A is de stoomcilinder, waarin een zuiger C zich op en neêr kan bewegen. De stoom uit den ketel komt in de buis K, die slechts gedeeltelijk in de figuur is afgebeeld en achter den cilinder heen loopt tot in L; daar komt zij uit in eene kas *l*, de stoomkas genaamd, waarin zich eene schuif kan op en neêr bewegen. In die stoomkas komen drie kanalen of buizen uit; het bovenste gaat naar het bovenste gedeelte van den cilinder, het onderste kanaal naar het gedeelte

(1) Voor meerdere bijzonderheden dienaangaande verwijzen wij naar werken, waarin de stoomwerktuigen uitvoeriger behandeld worden, onder andere naar de werktuigkunde van Delaunay, in onze taal overgebragt door Delprat en Brutel de la Rivière.

Fig. 208.



van den cilinder onder den zuiger, terwijl de middelste opening O in verband staat met eene buis, die naar den condensor B geleidt. De schuif in de stoomkas *l* is zoodanig ingerigt, dat zij gemeenschap daarstelt tusschen de buis O, die naar den condensor geleidt, en een der beide andere kanalen, die met het bovenste of het onderste gedeelte van den cilinder in verband staan; in den door de figuur aangewezenen stand bestaat er gemeenschap tusschen de buis O en het bovenste kanaal, dus ook tusschen den condensor B en de ruimte in den cilinder boven den zuiger. Daarentegen kan de stoom, die door de buis KL in de stoomkas komt, in geene van deze beide openingen komen, doch wel door de onderste opening in het benedenste gedeelte van den cilinder. Is dus de condensor gedeeltelijk met koud water gevuld, of wordt daarin door middel van de buis *a* koud water gespoten, dan wordt de stoom, die zich boven in den cilinder A bevindt, gecondenseerd, terwijl daarentegen die in het onderste gedeelte eene aanzienlijke drukking uitoefent, waarvan eene opwaartsche beweging van dien zuiger het gevolg moet zijn. Is de zuiger boven in den cilinder gekomen, dan zal zich ten gevolge van eene inrigting, die wij straks beschrijven zullen, de stoomschuif in *l* benedenwaarts verplaatsen, zoodat er nu door middel van die schuif gemeenschap komt tusschen de buis O en het benedenste kanaal, dat naar de onderste ruimte in den cilinder voert, terwijl de stoom uit L door het bovenste kanaal boven in den cilinder komen kan. Daar de stoom onder in den cilinder nu door de gemeenschap met den condensor gecondenseerd wordt, zal de zuiger door de spanning van den zich daarboven bevindenden stoom zich benedenwaarts bewegen. Men zal dus ligt inzien, dat bij gestadigen toevoer van stoom de op- en neergaande beweging van de stoomschuif voldoende is, om den zuiger en met dezen het linker uiteinde van de balans D op en neer te doen gaan.

Het water in den condensor, zoowel door inspuiting van koud water als door condensatie van stoom daarin gekomen, wordt verwijderd door middel van de pomp G. Deze is ingerigt als eene gewone zuigpomp met twee kleppen in den zuiger (102). Door de klep *s*, die bij de opgaande beweging van den pompzuiger wordt opgeligt, treedt het water uit den condensor in de pomp; bij den neergaanden slag van dien zuiger gaat het door de kleppen, die zich daarin bevinden, naar boven en wordt vervolgens mede omhoog gevoerd, tot het loopt in den bak *b*, waaruit het door de in de figuur aangewezene buis *g* gevoerd wordt naar eene zuig- en perspomp H; door middel van deze wordt het door de buis *h* naar den ketel geperst. Op die wijze wordt dus de ketel, in plaats van met koud water, met warm water voorzien, hetgeen eenige besparing van brandstof ten gevolge heeft. De stoom, die uit den ketel komt, is

altijd vermengd met lucht; deze geraakt dus in den condensor en zoude, indien zij zich daar verzamelde, eene schadelijke tegendrukking op den zuiger C veroorzaken; door de pomp G wordt echter te gelijk met het warme water ook deze lucht uit den condensor verwijderd; daarom draagt die pomp doorgaans den naam van *luchtpomp*, welke naam echter niet moet verward worden met dien, welken wij hebben gegeven aan den toestel (96), waardoor de lucht in eene bepaalde ruimte verdund wordt. De pomp H, waardoor het warme water naar den stoomketel wordt geperst, draagt den naam van *warmwaterpomp* of *voedingspomp*. Eindelijk is er nog eene derde pomp J, welke alleen dient om uit een put koud water op te pompen, en dit door de buis *d* te brengen naar den bak *e*, waarin zich de condensor en de luchtpomp bevinden; om haar van de zoo even genoemde te onderscheiden, wordt de pomp J doorgaans de *koudwaterpomp* genoemd. De drie pompen worden door middel van de stangen *p*, *q* en *r* door de balans, dus door het werktuig zelf, in beweging gebragt.

De op- en neêrgaande beweging van het regter uiteinde van de balans moet voorts in eene ronddraaijende veranderd worden. Te dien einde bevindt zich aan het uiteinde eene stang E, die verbonden is met eene kruk *n*, door welke de as *f* aan het draaijen wordt gebragt. Men zal ligtelijk inzien, dat deze ronddraaijende beweging niet eenparig kan zijn; om evenwel hare regelmatigheid te bevorderen is op dezelfde as één groot ijzeren rad F bevestigd, *vliegwiel* genaamd, waardoor de massa aanzienlijk vermeerderd en dus de vertraging of versnelling der beweging minder aanzienlijk gemaakt wordt (1). Dit vliegwiel dient tevens om gemakkelijk over de zoogenaamde *doode punten* heen te komen. Daardoor verstaat men namelijk den stand, waarin het werktuig zich bevindt, als de kruk *n* en de krukstang E zich in elkanders verlengde bevinden of elkaar bedekken, in welk geval de kracht, die altijd in de rigting van de krukstang E werkt, op het middenpunt der as *f* en dus op een vast punt zoude gerigt zijn, zoodat er geene beweging zoude kunnen plaats hebben, indien niet door de werking van het vliegwiel die stand terstond in een anderen overging.

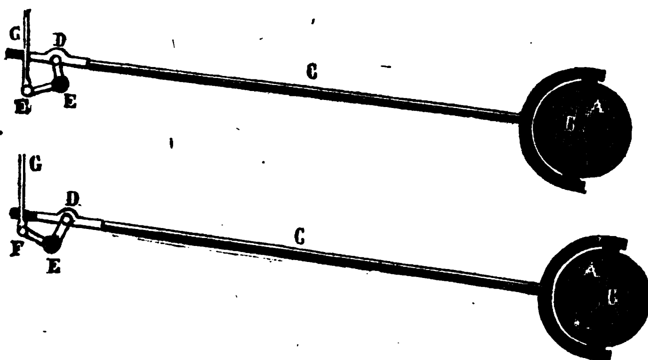
De ronddraaijende beweging dezer as kan gemakkelijk overgebragt worden op allerlei werktuigen, waarvan men zich in de fabrieken bedient. Ook bij het stoomwerktuig zelf maakt men reeds daarvan gebruik, zoowel om aan de stoomschuif in *l* de noodige op- en neêrgaande beweging te geven, als om den toevoer van den stoom uit den ketel te regelen.

---

(1) Over de werking der vliegwielen kunnen wij hier in geene bijzonderheden treden; wij verwijzen daarvoor naar het hiervoor aangehaalde werk van Delaunay.

De toestel, waardoor de stoomschuif in beweging wordt gebragt, is afzonderlijk voorgesteld in fig. 209. Aldaar is A de hoofdas, in fig. 208 door *f* voor-

Fig. 209.



gesteld; op deze as is eene metalen schijf B bevestigd, doch in dier voege, dat het middenpunt dier schijf niet zamenvalt met het middenpunt der as, waarom men haar den naam geeft van *excentriekschijf*; om deze schijf sluit een metalen ring, die met eene stang C verbonden is. Draait nu de as A, en met haar de schijf B, in de rondte, dan zal die ring met de stang eene eenigzins zamengestelde beweging ondergaan, die eene heen- en weergaande beweging van het punt D zal ten gevolge hebben, zooals duidelijk is uit de twee verschillende in fig. 209 afgebeelde standen. De hefboom DEF zal zich dus om het vaste punt E heen en weêr bewegen, en de stang G verkrijgt daardoor eene op- en neêrgaande beweging. Daar de stoomschuif aan deze stang bevestigd is, wordt dus door de ronddraaijende beweging der hoofdas aan de stoomschuif de gevorderde beweging gegeven. Wil men het werktuig doen ophouden, dan behoeft men de stang C slechts van den knop D op te ligten; in dat geval houdt de beweging der stoomschuif op, en kan dus de stoom niet meer beurtelings aan beide kanten van den zuiger B (Fig. 208) komen.

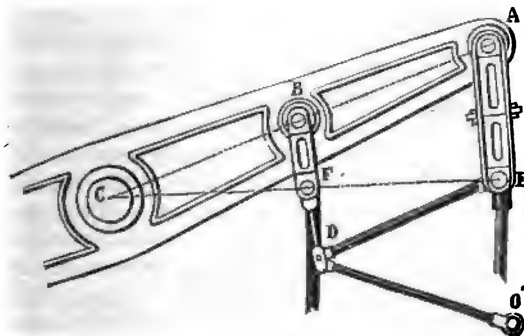
De inrigting, waardoor de toevoer van stoom uit den ketel wordt geregeld, berust op de werking der middenpuntvliedende kracht. Door middel van getande raderen is namelijk de as *f* (Fig. 208) verbonden met eene vertikale stang, die zich in de kolom R bevindt, en door die raderen eene ronddraaijende beweging verkrijgt. Aan haar zijn twee metalen ballen bevestigd, die om scharniertjes *z* kunnen draaijen. Wordt de beweging schielijker, dan zal ook de middenpuntvliedende kracht van de beide ballen toenemen; zij

trachten zich dus van de stang, waarom zij draaijen, te verwijderen, en ligten daardoor den ring *y* op; met dezen ring is eene stang *x* verbonden, die dus naar boven wordt gedreven, wanneer de ballen van S zich verder van de as verwijderen, dat is, wanneer de beweging van het stoomwerktuig schielijker wordt. Door middel van twee hefboomen *k k* en twee stangen *m m* wordt de beweging van *x* overgebragt op eene klep *u*, welke zich bevindt in de buis KL, waardoor de stoom uit den ketel in de stoomkas *l* geraakt. De klep *u*, de *smoorklep* genaamd, zal in dit geval den stoom eenigzins belemmeren in zijne beweging naar de stoomkas; er komt dus minder stoom in den cilinder, en de beweging wordt langzamer. Men zal ligt inzien, dat door middel van dezen toestel, die den naam van *centrifugaal-regulator* of *gouverneur* draagt, de regelmatige gang van het stoomwerktuig zeer bevorderd wordt.

De hier beschreven vorm is die, welke bij de meeste vaste stoomwerktuigen aangetroffen wordt; de stoomschuif is echter dikwijls anders ingerigt. Met de beschrijving van hare onderscheidene vormen kunnen wij ons hier echter niet bezig houden, daar dit meer tot het gebied der werktuigkunde, dan tot dat der natuurkunde behoort.

227. **Parallelogram van Watt.** — Bij de beide hier beschreven stoomwerktuigen wordt de op- en neêrgaande beweging van den zuiger in den cilinder overgebragt op de balans. Het uiteinde van deze kan echter niet zoo als die zuiger eene regtlijnige beweging aannemen, maar het moet een cirkelboog beschrijven, waarvan het middenpunt in het steunpunt der balans gelegen is. Was dus de zuigerstang onmiddellijk met de balans verbonden, dan zoude zij door de beweging steeds gewrongen worden, en tegen de opening in het deksel van den cilinder eene aanzienlijke wrijving veroorzaken. Dit bezwaar heeft Watt weggenomen, door die stang op eene bijzondere wijze aan de balans te bevestigen, zoo als in fig. 207 en 208 is voorgesteld, en in fig. 210 afzonderlijk is afgebeeld.

Fig. 210.



Zij CBA de eene helft der balans, AE, BD, DE en DO ijzeren stangen,

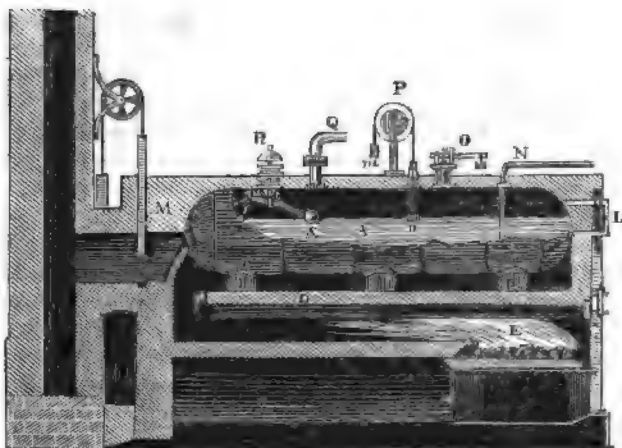
welke alle zich om scharnieren kunnen bewegen, terwijl het uiteinde O van de laatstgenoemde stang, even als het midden C der balans, vast is. De lengte dezer stangen is zoodanig genomen, dat OD, DE, AB en BC even groot zijn, en dat ook BD en AE onderling gelijk zijn; ABDE is dus een parallelogram. Beschouwt men eerst het gedeelte CBDO op zich zelf, dan bestaat dit uit twee even lange staven CB en DO, door eene dwarsstang BD verbonden; nu kan door middel van de hoogere wiskunde bewezen worden, dat wanneer C en O vaste punten zijn, en de stangen CB en DO zich om die punten bewegen, het midden F der verbindingstang BD nagenoeg eene regte lijn beschrijft. Men kan zich ook proefondervindelijk daarvan overtuigen, door den in fig. 210 afgebeelden toestel van bordpapier of hout te vervaardigen, en in F een potlood te bevestigen; maakt men dan C en O vast, en beweegt men de stangen heen en weêr over een stuk papier, dan zal het potlood eene lijn beschrijven, die over hare grootste uitgestrektheid als regt kan beschouwd worden. Men zal dus ligt inzien, dat wanneer men in F de zuigerstang eener pomp bevestigt (bij de stoomwerktuigen van dubbele werking is het doorgaans die van de luchtpomp), deze in hare beweging geene belemmering zal ondervinden. Doch F is niet het eenige punt, dat in dit geval verkeert; ook met E is zulks het geval, want daar AE en BD steeds evenwijdig aan elkander blijven, even als AB en DC, zoo zal ook de afstand CF steeds aan FE gelijk blijven, en dus de beweging van E eveneens nagenoeg regtlijnig zijn. Indien dus de zuigerstang van den cilinder in E door een scharnier bevestigd wordt, zal ook deze de gevorderde regtlijnige beweging aannemen.

228. **Stoomketels.** — Zonder eene naauwkeurige beschrijving der stoomketels te geven, zullen wij toch enkele bijzonderheden aangaande hunne inrigting mededeelen. Het best kan dit geschieden door de beschrijving van den in fig. 211 en 212 afgebeelden ketel, welke van de voornaamste der gewoonlijk daarbij voorkomende toestellen voorzien is.

Fig. 211 stelt den ketel voor in de lengte, fig. 212 in dwars-doorsnede. De eigenlijke ketel A, gewoonlijk van plaatijzer vervaardigd, heeft de gedaante van een cilinder, welke aan de beide uiteinden door twee halve bollen gesloten is. Onder dezen ketel bevinden zich twee cilindrische buizen BB, die nagenoeg even lang zijn als de ketel zelf, en door middel van zes pijpen C daarmede gemeenschap hebben. Zoo als duidelijk in de beide afbeeldingen te zien is, bevindt zich in den vuurhaard een beschot D, dat de geheele breedte vervult, doch niet de geheele lengte. De vlam van het zich bij E bevindende vuur gaat dus eerst onder het beschot D en de kookbuizen BB tot achter in den vuurhaard, waar zij achter dat beschot heen komt om zich

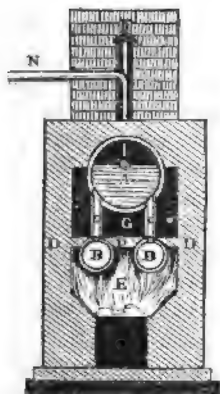
te begeven in den middensten vuurgang G. De ruimte namelijk tusschen het beschot en den ketel A is in drie gedeelten gescheiden door twee vertikale be-

Fig. 211.



schotten, welke zich tusschen de pijpen C bevinden. De vlam, door de middelste rookgeleiding G gaande, strijkt onder langs den ketel en verdeelt zich, vooraan gekomen, weder in tweeën, daar zij zich dan door de beide buitenste rookgeleidingen of vuurgangen naar den schoorsteen begeeft. In dezen bevindt zich een zoogenaamd register M, dat bestaat uit eene schuif met een tegenwigt; hierdoor kan de opening naauwer of wijder gemaakt, en dus de trek in den vuurhaard geregeld worden.

Fig. 212.



Daar in fig. 211 een gedeelte van den ketel is weggenomen, kan men daarbinnen de inrigting zien van de onderscheidene toestellen, die men er doorgaans bij aantreft. L is eene eenvoudige waterpeilbuis, waarvan wij reeds vroeger (63) melding hebben gemaakt. N is de buis, door welke warm water wordt aangevoerd; zij staat in verband met de boven beschreven voedingspomp. De buis Q is de stoombuis, door welke stoom naar de stoomkas en verder naar

den cilinder gevoerd wordt. O is eene zoogenaamde veiligheidsklep. Zij bestaat uit een hefboom, wiens linkeruiteinde vast is, terwijl aan het regteruiteinde een gewigt is opgehangen. Wordt de spanning van den stoom te sterk, dan wordt een klepje, dat met dien hefboom in *a* verbonden is, opgeligt en de stoom kan ontsnappen. P is een toestel, die dient om aan te wijzen, of er nog genoeg water in den ketel is. Het gewigt *m* is namelijk iets minder zwaar dan het holle gewigt *n*, dat steeds op het water drijft en *vlotter* genoemd wordt; daalt de waterspiegel in den ketel, dan gaat ook *n* naar beneden en *m* naar boven; doorgaans bevindt zich op het katrolletje, waarover het touw loopt, een wijzer, die den stand van *n* in den ketel aanwijst. De toestel R eindelijk, *alarmfluit* genaamd, heeft ook tot doel om aan te wijzen, wanneer er te weinig water in den ketel is. Hij bestaat uit een hefboom, wiens steunpunt zich in *r* bevindt; aan zijn linkeruiteinde bevindt zich een gewigtje, en aan het andere een iets zwaarder hol gewigt *s*, dat steeds moet drijven. In *t* is een knopje, waardoor de buis *u* gesloten blijft, zoolang *s* door het water wordt naar boven gedrukt. Vermindert echter het water en daalt *s*, dan blijft de buis *u* niet meer gesloten, maar laat den stoom uit, die dan, met kracht tegen een klokje R komende, een schel geluid doet hooren, waardoor de machinist wordt gewaarschuwd.

Uit het voorgaande blijkt, dat men bij de inrigting der stoomketels vooral zorg draagt, dat de waterspiegel niet te veel daalt. Inderdaad zijn die voorzorgen noodzakelijk, omdat in de meeste gevallen het springen van stoomketels aan den te lagen waterstand schijnt te moeten worden toegeschreven. Indien toch het gedeelte van den ketel, dat van buiten met de vlam in aanraking is, van binnen niet bevochtigd wordt gehouden, kan het ligt gloeijend worden, hetgeen op de sterkte van het ijzer eenen zeer nadeeligen invloed uitoefent. Daarenboven zal, zoo dit gloeijende gedeelte met water in aanraking komt, in korten tijd eene zeer groote hoeveelheid stoom van aanzienlijke spanning gevormd worden, waaraan de ketel welligt geen weêrstand zoude kunnen bieden.

Behalve de vermelde toestellen moeten zich aan den ketel steeds een of meer manometers bevinden, waardoor de spanning van den stoom wordt aangewezen. Men bedient zich doorgaans van kwik-manometers bij vaste stoomwerktuigen; bij de locomotieven en andere van dien aard wordt tegenwoordig veel gebruik gemaakt van den manometer van Bourdon (95).

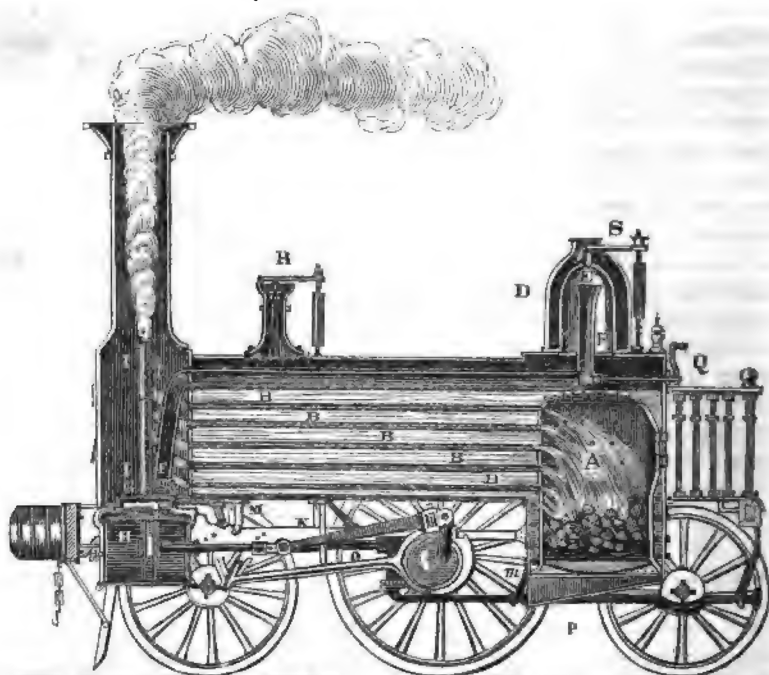
229. **Stoomwerktuigen van hooge drukking.** — De beschrevene stoomwerktuigen van Watt van dubbele werking en met condensatie beslaan veel plaats, hetgeen hoofdzakelijk is toe te schrijven aan de ruimte, door den condensor, de luchtpomp en de koudwaterpomp ingenomen. Om dit

bezwaar weg te nemen construeert men ook stoomwerktuigen zonder condensatie; daarbij heeft men echter als schadelijke tegendrukking aan den eenen kant van den zuiger niet de geringe drukking, door de onvolkomen condensatie van den stoom veroorzaakt, maar de luchtdrukking. Het is dus noodig om bij zoodanige werktuigen stoom van veel aanzienlijker spanning te gebruiken. Stellen wij bijv., dat men bij een stoomwerktuig met condensatie stoom gebruikt, welke eene spanning van $1\frac{1}{4}$ atmospheer heeft, en dat de temperatuur in den condensor 40° bedraagt, zoodat aldaar blijkens de tabel op bladz. 292 de stoom nog eene drukking van nagenoeg 55 strepen kwikzilver of 0,07 atmospheer uitoefent, dan zal er nog eene voordeelige drukking van 1,18 atmospheer, dat is van nagenoeg 1,22 pond op elken vierkanten duim, overblijven. Heeft er daarentegen geene condensatie plaats, en komt dat gedeelte van den cilinder, waarin zich de reeds gewerkt hebbende stoom bevindt, in gemeénschap met de buitenlucht, dan zal de nuttige drukking bij dit werktuig slechts $\frac{1}{4}$ atmospheer of 0,26 pond op iederen vierkanten duim bedragen. Het is dus noodig, zoo men eene aanzienlijke kracht wil uitoefenen, om stoom van eene grootere spanning te gebruiken; en daar men, zooals uit de tabel op bladz. 308 blijkt, slechts weinig meer warmte noodig heeft om aan den stoom eene hoogere temperatuur en dus ook eene hoogere spanning te geven, zoo brengt men ze doorgaans tot 5, 6 of nog meer atmospheren. Zoodanige werktuigen dragen den naam van *stoomwerktuigen van hooge drukking zonder condensatie*, terwijl men aan die, waarin men geen stoom van meer dan twee atmospheren gebruikt, en tevens den stoom, die gewerkt heeft, condenseert, den naam van *stoomwerktuigen van lage drukking met condensatie* geeft. Wij moeten echter hierbij opmerken, dat ook de aanwending van stoom van hoogere drukking dikwijls met de toepassing van condensatie gepaard gaat.

230. **Locomotieven.** — Zonder in vele bijzonderheden te treden aangaande de gewone inrigting der stoomwerktuigen van hooge drukking, welke blijkens het voorgaande eenvoudiger kan zijn dan van die met condensatie, bepalen wij ons tot de beschrijving van de locomotieven, welke eveneens tot deze soort behooren.

De eerste pogingen om van de stoomkracht gebruik te maken om rijtuigen voort te trekken zijn reeds ten tijde van Watt geschied; zij leidden echter tot geene gunstige uitkomsten. De groote zwarigheid bestond daarin, dat men niet eene hoeveelheid stoom wist te krijgen, voldoende om het werktuig met de verlangde snelheid in beweging te houden; dit was slechts daaraan toe te schrijven, dat men geen middel wist te vinden om binnen eene beperkte ruimte de oppervlakte van den ketel, die met het vuur in aanraking is, groot genoeg te maken. Eerst in 1827 werd dit vraagstuk opgelost door Seguin en in

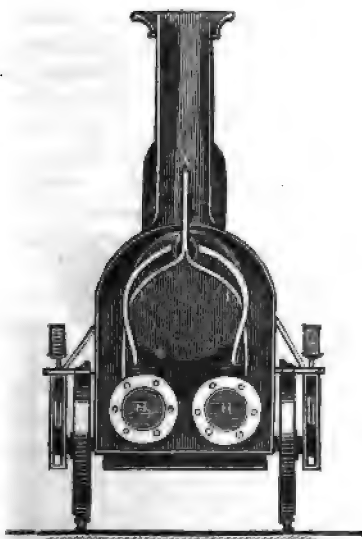
Fig. 213.



1829 door Stephenson in toepassing gebragt bij de soort van locomotieven, die in fig. 213 is voorgesteld. Aldaar is A de vuurhaard, waaruit de vlam in eene menigte pijpen BB treedt, welke door de geheele lengte van den ketel gaan, en zich geheel onder het water bevinden; nog duidelijker blijkt dit uit de dwars-doorsnede, in fig. 214 voorgesteld; het getal dier pijpen bedraagt ruim 100 of nog meer; haar middellijn is 4 of 5 duim. Op deze wijze is het oppervlak, dat met het vuur in aanraking is, veel aanzienlijker, en bedraagt doorgaans meer dan 12 vierkante ellen. De rook treedt, na door die pijpen gegaan te zijn, in den schoorsteen C. De stoom wordt in den ketel, doorgaans *tubulaire* ketel genoemd, gevormd en verzamelt zich in den kap D. Daar komt hij in de opening E der buis F, welke men zoo hoog mogelijk in den kap laat komen, om te beletten, dat door den stoom water medegenomen wordt. Door de buis F komt de stoom tot in de stoomkas G, waarin zich eene dergelijke stoomschuif

heen en weêr beweegt, als wij bij het stoomwerktuig van Watt van dubbele werking beschreven hebben. Ook hier zijn drie kanalen, waarvan de beide uiterste naar het linker en het regter gedeelte van den cilinder H voeren, terwijl het middelste geleidt naar de buis I, die in den schoorsteen uitkomt. De stoom, die bij deze soort van werktuigen eene aanzienlijke spanning heeft, komt dus met geweld uit de opening der buis, na in den cilinder op den zuiger gewerkt te hebben, en bevordert daardoor den trek van den schoorsteen, die anders door de snelle beweging moeijelijk zoude te verkrijgen zijn; de voor de verbranding noodige lucht komt bij *m* onder in den vuurhaard. Men zal dus ligt inzien, dat de trek zeer aanzienlijk is, wanneer de locomotief in beweging is, doch slechts gering zoolang zij stilstaat. De heen- en weêrgaande beweging van den zuiger wordt door middel van de krukstang K en de kruk L op het middelste rad overgebragt. Het is dus eigenlijk alleen dat rad, dat in beweging wordt gebragt; de andere staan in geene verbinding met het stoomwerktuig. De stoomschuif ontvangt hare beweging van de staaf M, die met een excentriek in verband staat. De ketel wordt gevoed door middel van het pompje O, welks zuiger zich tegelijk met den zuiger in den cilinder heen en weer beweegt; het water wordt aangevoerd door de buis P. Alle hier beschrevene werktuigen zijn in dubbel getal aanwezig; zij bevinden zich zoowel regts als links van den stoomwagen, zoo als duidelijk is uit fig. 214, waar HH de beide cilinders voorstellen. Deze bevinden zich hier tusschen de raderen; tegenwoordig worden echter veel locomotieven vervaardigd, bij welke de cilinders meer naar buiten geplaatst zijn. De beide buizen I vereenigen zich echter, zoodat de stoom slechts door ééne opening X in den schoorsteen komt. Bij Q bevindt zich nog een krukje, waarmede de buis F kan gesloten worden; R en S zijn twee veiligheidskleppen, bij welke echter de gewigten door veêren zijn vervangen.

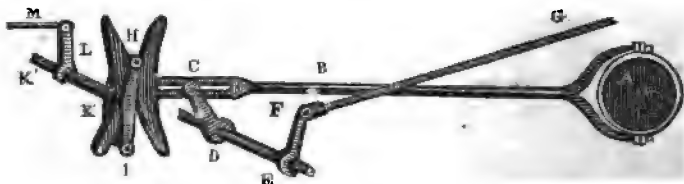
Fig. 214.



De excentriek is afzonderlijk afgebeeld in fig. 215; zij is daar eenigzins anders ingerigt dan in fig. 213 en wel zoodanig, dat de machinist van zijne plaats achter op

de locomotief deze naar verkiezing achteruit of vooruit kan doen loopen. Aan de excentriekschijf A is de stang B bevestigd, waarin eene sleuf is gemaakt, in welke een knopje C ingrijpt. Dit knopje bevindt zich aan het eind van een hefboom CDEF, die door de stang G wordt in beweging gebragt. Men zal ligt inzien, dat wanneer aan deze stang G, wier uiteinde zich onder het bereik van den machinist bevindt, getrokken wordt, het gedeelte der stang B, waarin het sleufje gemaakt is, wordt opgeligt. Voorbij het sleufje bevindt zich eene dubbele vork,

Fig. 215.



waartegen een toestel IH rust, die op de as KK' bevestigd is. Op dezelfde as bevindt zich een arm L, welke door middel van de stang M met de stoomschuif in verband staat. Wordt nu door de beweging van de stang G de stang B naar beneden gedrukt, dan zal het linker benedenbeen van de vork tegen I aan drukken; IH draait daardoor om zijn midden en doet dus ook de as KK' draaijen; L wordt dus een weinig naar den linkerkant gedrukt, en de stoomschuif verandert eensklaps van plaats en neemt juist den tegenovergestelden stand aan. De stoom komt dus anders in den cilinder, hetgeen eene verandering in de rigting der beweging ten gevolge heeft.

In den laatsten tijd heeft men zich vooral beijverd om de trekkracht der locomotieven te vermeerderen, door haar gewigt aanzienlijker te maken. Die trekkracht, veroorzaakt door de wrijving der raderen op de spoorstaven, wordt uitgedrukt door het product van het gewigt met den wrijvingscoëfficent van ijzer op ijzer, die 0,13 bedraagt. Het gewigt bedraagt somtijds 35000 pond; hierbij valt echter op te merken dat slechts een gedeelte daarvan door de beide drijfraderen wordt gedragen. Bij zeer groote locomotieven kan ook door vermeerdering van het getal der buizen de oppervlakte, die met het vuur in aanraking is, grooter gemaakt worden; zij bedraagt daarbij somtijds meer dan 100 vierkante ellen.

De stoom, die bij de locomotieven gebruikt wordt, is doorgaans van 5 of 6 atmospheren; in den laatsten tijd heeft men zelfs stoom van 9 atmospheren aangewend.

231. Expansie van den stoom. — Bij de hier beschrevene stoomwerktuigen zijn wij steeds van de onderstelling uitgegaan, dat de drukking van den stoom op den zuiger in den cilinder gedurende den geheelen slag dezelfde blijft; zulks zal ook inderdaad het geval zijn, wanneer gedurende al dien tijd het gedeelte van den cilinder, waar zich de stoom bevindt, in verbinding blijft met de stoomkas, en door deze met den stoomketel. Anders zal het echter gesteld zijn, indien de opening, waardoor de stoom in den cilinder komt, gesloten wordt vóór dat de zuiger nog zijn geheelen loop volbragt heeft. De in den cilinder aanwezige stoom werkt dan alleen door zijne veêrkracht; hij zet zich uit, en daar zijne spankracht vermindert, naarmate hij zich over eene grootere ruimte verspreidt, zal de drukking op den zuiger steeds afnemen. Het is duidelijk, dat in dit geval minder kracht wordt uitgeoefend; maar deze vermindering is slechts gering in vergelijking van de besparing in stoom en dus ook in brandstof. Onderstellen wij, om dit met een voorbeeld op te helderen, dat er stoom van eene zekere spanning h in den cilinder komt, doch dat de toevoer ophoudt, als de zuiger $\frac{1}{4}$ van zijn weg volbragt heeft. De spanning op de helft van den zuigerslag zal dan $\frac{1}{2}h$ bedragen, daar de stoom dan eene tweemaal grootere ruimte beslaat; op drie vierden van den zuigerslag is de spanning slechts $\frac{1}{3}h$, en op het oogenblik, dat de zuiger aan het einde van zijnen weg komt, bedraagt zij niet meer dan $\frac{1}{4}h$. Nemen wij, om de gemiddelde spanning bij benadering te berekenen, aan, dat de spanning gedurende elk vierde gedeelte van den zuigerslag standvastig is, en wel de gemiddelde van de spanningen bij het begin en bij het einde van dat gedeelte, dan zal zij gedurende het 1e, 2e, 3e en 4e geweest zijn h, $\frac{3}{4}h$, $\frac{5}{12}h$ en $\frac{7}{24}h$, waarvan het gemiddelde $\frac{59}{96}h$ is. De nuttige werking zal dus nagenoeg dezelfde geweest zijn, als wanneer de stoom gedurende den geheelen slag met eene standvastige spanning van $\frac{59}{96}h$ gewerkt had. De gemiddelde spanning is dus wel minder, dan wanneer de stoom gedurende den geheelen slag *met vol vermogen*, zoo als men het noemt, gewerkt had, maar men heeft ook slechts $\frac{1}{4}$ van den in dat geval vereischten stoom gebruikt. Uit dat oogpunt beschouwd, is dus de nuttige werking aanzienlijker geweest in de verhouding van 24 tot 59, dat is als 1 : 2,4. Deze wijze om den stoom te laten werken noemt men *expansie*, *ontspanning* of *uitzetting* van den stoom.

De berekening, die wij hier hebben gedaan voor het geval dat de stoom gedurende $\frac{1}{4}$ van den zuigerslag met vol vermogen, en gedurende de overige $\frac{3}{4}$ met expansie werkt, was slechts eene benaderde, daar wij niet op het *gedurig* afnemen van de spanning hebben acht gegeven. Naauwkeuriger wordt de verhouding tusschen de werking met vol vermogen en die met expansie uitgedrukt in de volgende tafel, waar n het gedeelte van den zuigerslag uit-

drukt, gedurende hetwelk de stoom met vol vermogen werkt, terwijl C de verhouding aanwijst tusschen de werking eener zekere hoeveelheid stoom met vol vermogen, en die eener gelijke hoeveelheid stoom, met expansie werkende.

Waarde van n.	Waarde van C.	Waarde van n.	Waarde van C.
1	1,000	$\frac{1}{6}$	2,791
$\frac{1}{2}$	1,693	$\frac{1}{7}$	2,946
$\frac{1}{3}$	2,098	$\frac{1}{8}$	3,079
$\frac{1}{4}$	2,386	$\frac{1}{9}$	3,197
$\frac{1}{5}$	2,609	$\frac{1}{10}$	3,303

Van de uitzetting van den stoom wordt tegenwoordig bij de stoomwerktuigen veel gebruik gemaakt, althans bij die, waarin stoom van hooge drukking gebruikt wordt; uit den aard der zaak zijn stoomwerktuigen van lage drukking minder geschikt om door expansie te werken, omdat daarbij weldra de spanning niet aanzienlijk genoeg zoude zijn om de tegendrukking, door onvolkomen condensatie veroorzaakt, te overwinnen. Ook is eene bijzondere inrigting van de stoomschuif noodig, om de gemeenschap tusschen de stoomkas en den cilinder op het juiste oogenblik te doen ophouden; de beschrijving dier toestellen laten wij evenwel hier achterwege.

232. **Arbeid door de stoomwerktuigen verrigt.** — Wanneer wij de werking van een stoomwerktuig willen nagaan, dan moeten wij den door hetzelve verrigten arbeid niet alleen vergelijken met de hoeveelheid verbruikten stoom, maar ook met de hoeveelheid brandstof, die noodig is om dien stoom te verkrijgen. Het verband tusschen de hoeveelheden stoom en brandstof zullen wij eigenlijk eerst leeren kennen, als wij weten, hoeveel warmte-eenheden bij de verbranding ontwikkeld worden. Hiervan zal eerst later (240) sprake zijn; zonder reeds nu daaromtrent in bijzonderheden te treden, mogen wij echter als bekend aannemen, dat bij de verbranding van een pond steenkolen ongeveer 7600 warmte-eenheden ontwikkeld worden. Daar gemiddeld 650 warmte-eenheden noodig zijn om water tot stoom te maken (219), zoo zoude hieruit volgen, dat een pond steenkolen voldoende is om 11,8 pond water tot stoom te doen overgaan. In de werkelijkheid is dit echter niet het geval, daar een aanzienlijk gedeelte der warmte verloren gaat door de inrigting van de ovens, het trekken

der schoorsteenen, onvolkomen verbranding, enz. Bij de best ingerigte groote ketels mag men stellen, dat een pond steenkolen voldoende is om $6\frac{1}{2}$ tot 7 pond stoom voort te brengen; voor de meeste kleinere ketels bedraagt de hoeveelheid stoom echter niet meer dan 3 of 4 pond.

Het verband tusschen de hoeveelheid verbruikten stoom en den nuttigen arbeid, die daardoor verrigt wordt, hangt af van de inrigting der stoomwerktuigen. Beschouwen wij in de eerste plaats die, waarbij de stoom zonder expansie werkt. De arbeid, die in den cilinder in eene seconde wordt verrigt, wordt uitgedrukt door het product van de kracht, vermenigvuldigd met den weg, dien de zuiger in dien tijd doorloopt. De kracht is het product van de oppervlakte van den zuiger met de drukking van den stoom. Is dus r de straal van dien zuiger in duimen, h de drukking van den stoom op elken vierkanten duim, uitgedrukt in ponden, h' de schadelijke tegendrukking aan den anderen kant van den zuiger, op gelijke wijze uitgedrukt, en v de weg, dien de zuiger in eene seconde aflegt, uitgedrukt in ellen, dan wordt de arbeid voorgesteld door $\pi r^2 v\,(h - h')$. Het volume V van den gebruikten stoom bedraagt $\pi r^2 v$, zoodat de arbeid ook kan worden uitgedrukt door de formule $V(h - h')$. Wil men echter van deze laatste formule gebruik maken, dan is het noodig dat r en v in dezelfde maat worden uitgedrukt.

Bij de stoomwerktuigen met expansie kan deze eenvoudige formule niet dienen, daar noch de spanning, noch de tegendrukking op zulk eene eenvoudige wijze kunnen worden uitgedrukt. Beide ondergaan dan eene wijziging; in plaats van h moet men het product van deze met den coëfficient C uit het tafeltje op bladz. 332 nemen; h' moet vermenigvuldigd worden met $\frac{1}{n}$, alvorens van Ch te worden afgetrokken. De formule, die den in eene seconde verrigten arbeid uitdrukt, wordt dan $V\left(Ch - \frac{1}{n}h'\right)$, waarin V het volume aanduidt van den stoom, voor dat hij door uitzetting begint te werken, zoodat $\pi r^2 v = \frac{1}{n}V$ moet gesteld worden (1).

Voor de beide gevallen wordt door de gevondene formulen de arbeid uitgedrukt, die in den cilinder verrigt wordt; deze kan echter niet geheel als

---

(1) De formule, waarvan gewoonlijk wordt gebruik gemaakt, is

$$Vh + Vh \log\left(\frac{1}{n}\right) \times 2{,}303 - V\frac{h'}{n}$$

de waarden van C in het tafeltje zijn echter die van $1 + \log\left(\frac{1}{n}\right) \times 2{,}303$, zoodat, wanneer men van dat tafeltje gebruik maakt, de formule den hierboven gegeven eenvoudigen vorm kan aannemen.

nuttige arbeid beschouwd worden, daar een aanzienlijk gedeelte verbruikt wordt om de verschillende pompen in beweging te houden, en allerlei schadelijke tegenstanden te overwinnen. Men kan echter geen algemeenen regel geven voor het verschil tusschen den theoretischen arbeid en den nuttigen arbeid; dit is afhankelijk, zoowel van het vermogen van het werktuig, als van de wijze waarop het werkt. Men vermenigvuldigt daarom gewoonlijk den theoretischen arbeid met eenen coëfficient K, aan welken men naar gelang der omstandigheden de waarden geeft, die in het volgende tafeltje voorkomen (1).

Vermogen van het stoomwerktuig.	Waarde van K bij een stoomwerktuig			
	zonder condensatie en expansie.	met condensatie zonder expansie.	zonder condensatie met expansie.	met condensatie en expansie.
4 tot 8 paardekr.	0,61	0,60	0,45	0,41
10 „ 20 „	0,70	0,67	0,58	0,52
30 „ 50 „	0,79	0,73	0,71	0,63
60 „ 100 „	0,85	0,78	0,81	0,74

Hierbij valt nog op te merken, dat het aantal paardekrachten in de eerste kolom het werkelijk vermogen aanwijst, dat men verkrijgt door het theoretische met K te vermenigvuldigen. Is het dus te doen, om uit de afmetingen van een stoomwerktuig zijn vermogen te berekenen, dan moet de waarde van dien coëfficient eenigzins bij gissing genomen worden, zooals nader uit de voorbeelden zal blijken.

De formule voor den nuttigen arbeid T, uitgedrukt in arbeids-eenheden in elke seconde verrigt, is dus voor werktuigen zonder expansie

$$T = \pi r^2 v K (h - h'),$$

voor werktuigen met expansie

$$T = \pi n r^2 v K \left(Ch - \frac{1}{n} h'\right),$$

waarin de letters de hierboven aangeduide beteekenis hebben. Wij zullen haar gebruik door een paar voorbeelden ophelderen.

(1) Deze waarden zijn ontleend aan het werk: *Formules, tables et renseignements pratiques; aide-mémoire des ingénieurs, etc. par J. Claudel.* 1845.

Stellen wij, dat een stoomwerktuig werkt zonder expansie en zonder condensatie met eene spanning van $3\frac{1}{2}$ atmospheer, dat de zuiger eene middellijn van 24 duim heeft, terwijl de snelheid van den zuiger 0,9 el in de seconde bedraagt (1). In de eerste der opgegevene formules moet dan gesubstitueerd worden $r = 12$, $v = 0,9$, $h = 3,5 \times 1,033$; de tegendrukking moet echter aanzienlijker gerekend worden dan ééne atmospheer, omdat de lucht niet zoo schielijk door de naauwe opening in den cilinder kan ontwijken en dus eenigzins zamengedrukt wordt; men kan daarvoor gemiddeld 1,1 atmospheer nemen, zoodat dan $h' = 1,1 \times 1,033$ gesteld behoort te worden. Deze waarde substituerende, vindt men T = 1009 K; het theoretisch vermogen zoude dus $\frac{1009}{75} = 13$ paardekrachten bedragen. Neemt men nu volgens de bovenstaande tafel K = 0,65 dan zal men ongeveer $8\frac{1}{2}$ paardekracht voor het werkelijk vermogen van het stoomwerktuig vinden.

De hoeveelheid stoom in eene seconde bedraagt $\pi \times (0,12)^2 \times 0,9 = 0,0407$ kubieke ellen; in een uur zijn dus 147 kub. ellen noodig; de digtheid van stoom bedraagt bij eene spanning van $3\frac{1}{2}$ atmospheer 0,001859, zoodat deze 147 kub. ellen 273 pond wegen. In de praktijk moet echter dit getal grooter genomen worden, daar door afkoeling, enz. ten minste $\frac{1}{10}$ verloren gaat; er zullen dus ongeveer 303 ponden stoom in elk uur noodig wezen. Stelt men nu, dat bij deze werktuigen elk pond steenkolen 5,5 pond stoom geeft, dan worden er 55 pond steenkolen in het uur vereischt, of, daar het vermogen 8,5 paardekrachten bedraagt, ongeveer 6,4 pond per paardekracht en per uur.

Nemen wij als tweede voorbeeld een stoomwerktuig met condensatie en met expansie, waarbij de spanning 3 atmospheren, de tegendrukking $\frac{1}{8}$ atm. bedraagt, terwijl de stoom wordt afgesloten, zoodra de zuiger $\frac{1}{5}$ van zijn weg heeft afgelegd; dan hebben wij $n = \frac{1}{5}$, $h = 3,1$, $h' = 0,13$. Zij voorts de straal van den cilinder $r = 28$ duim, de snelheid $v = 1,3$ el, dan is, daar volgens de tabel op bladz. 332 C = 2,609 is, $T = \pi \times \frac{1}{5} \times (28)^2 \times 1,3 \times 7,438 \times K = 4763K$. Het theoretisch vermogen bedraagt dus ongeveer 64 paardekrachten; voor K zal men dus niet hooger dan 0,60 mogen nemen, zoodat het vermogen van dit werktuig op 38 paardekrachten mag gesteld worden. Het in eene seconde vereischte volume stoom bedraagt $\frac{1}{5} \times \pi \times (0,28)^2 \times 1,3 = 0,064$ kub. el, dus 230

---

(1) De snelheid van den zuiger zal men het best kunnen berekenen, door het aantal dubbele slagen waar te nemen, die in een bepaalden tijd, bijv. eene minuut, plaats hebben, en deze dan met de dubbele lengte van den zuigerslag te vermenigvuldigen. Neemt men bijv. in eene minuut 32 slagen waar, terwijl elke slag 1,1 el bedraagt, dan is de snelheid of de in eene seconde afgelegde weg $\frac{2 \times 32 \times 1,1}{60} = 1,17$ el.

kub. ellen per uur. Daar de digtheid van stoom van 3 atm. 0,001614 bedraagt, is dus het gewigt 371 pond. Het verlies op $\frac{1}{8}$ rekenende, zijn er 425 ponden noodig of, zoo men rekent dat een pond steenkolen 6 pond stoom geeft, 71 pond steenkolen per uur, dat is ongeveer 1,9 pond per paardekracht en per uur.

Men kan van de opgegevene formules ook gebruik maken om de afmetingen van een stoomwerktuig te berekenen, als men weet, welken arbeid het moet verrigten, en tevens de snelheid kent, waarmede de zuiger moet heen en weer gaan. Stellen wij, dat men in eene fabriek een stoomwerktuig van lage drukking met condensatie doch zonder expansie van 25 paardekrachten wenscht te plaatsen, welks zuiger 1 el in de seconde aflegt. Wij kunnen dan stellen $h = 1$ atm. $= 1{,}033$, $h' = 0{,}13$, $v = 1$, en volgens de tafel op bladz. 334 $K = 0{,}70$; de eerste der beide formules geeft dan

$$25 \times 75 = \pi r^2 \times 0{,}70 \times 0{,}903,$$

waaruit volgt $r = 30{,}7$ duim. De in eene seconde noodige stoom bedraagt dus 0,297 kub. el, dus per uur 1069 kub. el of 666 ponden. Het verlies op $\frac{1}{10}$ rekenende, zullen er 740 ponden stoom per uur noodig zijn, of, zoo een pond steenkolen 6 pond stoom geeft, 123 pond steenkolen. Daar het stoomwerktuig 25 paardekrachten sterk is, zullen er dus nagenoeg 5 pond steenkolen per uur en per paardekracht noodig zijn.

Nemen wij ten laatste nog het geval, dat men een stoomwerktuig van hooge drukking van 5 atmospheren en 12 paardekrachten met expansie doch zonder condensatie verlangt, waarbij de stoom gedurende $\frac{1}{3}$ van den slag met vol vermogen werkt, dan moet in de formule

$$T = VK\left(Ch - \frac{1}{n} h'\right)$$

gesubstitueerd worden $T = 12 \times 75 = 900$, $K = 0{,}58$, $h = 5{,}167$, $h' = 1{,}137$ (wanneer men onderstelt dat de tegendrukking $\frac{1}{10}$ meer is dan de drukking van den dampkring), $\frac{1}{n} = 3$, $C = 2{,}098$. Men verkrijgt daardoor $V = \frac{1}{3} \pi r^2 v = 209$. Is nu $v = 0{,}9$, dan moet $r = 14{,}9$ duim zijn. Het volume van den in eene seconde noodigen stoom van eene spanning van 5 atmospheren bedraagt 0,0209 kub. ellen, dus in een uur 75 kub. ellen of, daar de digtheid bij die spanning 0,002573 bedraagt, 193 pond. Rekent men op $\frac{1}{10}$ verlies, dan zijn er 214 pond stoom en $\frac{214}{6} = 36$ pond steenkolen noodig, dus 3 pond per paardekracht en per uur.

Uit deze voorbeelden blijkt duidelijk, dat de hoeveelheid brandstof, die voor het in werking houden van een stoomwerktuig vereischt wordt, zeer verschil-

lend is en afhangt van de inrigting van dat werktuig. De hier gevondene getallen kunnen bovendien niet voor volkomen juist gehouden worden; zij zijn slechts als eene benadering te beschouwen. De meerdere of mindere zorgvuldigheid waarmede de verschillende deelen vervaardigd zijn, vooral ook de inrigting der stoomketels en der ovens, waaraan men in den laatsten tijd vele verbeteringen heeft aangebragt, zullen daarop eenen grooten invloed uitoefenen. Bij de beste werktuigen met expansie, die in Cornwallis gebruikt worden om het water uit de mijnen te pompen, en waarbij dus geene draaijende hoofdas noch vliegwiel noodig is, heeft men het zoover gebragt, dat slechts één pond steenkolen per uur en per paardekracht noodig is.

G. WARMTEBRONNEN; MECHANISCHE THEORIE DER WARMTE.

233. **Warmtebronnen in het algemeen.** — Nadat wij in de voorgaande afdeelingen van dit hoofdstuk de voornaamste eigenschappen der warmte hebben leeren kennen, moeten wij thans nog de verschillende wijzen nagaän, waarop warmte in de ligchamen kan worden opgewekt; in andere woorden, wij moeten de bronnen van warmte leeren kennen, althans voor zoo ver die kennis binnen ons bereik gelegen is.

De bronnen van warmte moeten uit den aard der zaak in verschillende soorten gesplitst worden: 1° de onveranderlijke of permanente, waaronder wij alleen de zonnewarmte en de eigene warmte van den aardbol kunnen rangschikken; 2° mechanische middelen; 3° scheikundige werking; 4° electrische werking, en 5° de levensverrigtingen der dieren.

Wij zullen achtervolgens deze verschillende bronnen beschouwen, met uitzondering alleen van de electrische werking, omdat wij eerst later, wanneer wij de electrische verschijnselen hebben leeren kennen, het verband tusschen warmte en electriciteit naauwkeurig zullen kunnen nagaan.

234. **Zonnewarmte.** — Eene der belangrijkste warmtebronnen voor de bewoners der aarde is de zon. Het is eene aan ieder bekende daadzaak, dat het licht, dat van haar naar ons toekomt, steeds van warmte vergezeld is, en dat zij in de eerste plaats de oorzaak is van de dagelijksche temperatuurveranderingen.

De hoeveelheid warmte, die de zon in een bepaalden tijd mededeelt aan eene oppervlakte, waarop hare stralen loodregt invallen, hangt af van hare

hoogte boven den horizon en de meerdere of mindere zuiverheid van den dampkring, die een gedeelte van de warmte opneemt; het is ook alleen aan den dampkring toe te schrijven, dat de door de zon medegedeelde warmte geringer is, naarmate zij lager staat. Uit de onderzoekingen van Pouillet, en uit latere van Melloni en de Gasparin is gebleken, dat sommige zonnestralen beter dan andere door den dampkring geabsorbeerd worden, en dat deze dus als *thermochroïsch* (169) moet beschouwd worden; volgens Forbes komt gemiddeld slechts 0,68 van de zonnewarmte tot den aardbodem, terwijl het overige door den dampkring geabsorbeerd wordt. Volgens Pouillet moet een kubieke duim water onder gunstige omstandigheden door de regtstreeks en loodregt daarop invallende zonnestralen in eene minuut 6°,7 in temperatuur toenemen; door den invloed van den dampkring is de verhooging echter veel geringer. Uit zijne berekeningen blijkt voorts, dat indien er geene warmte door den dampkring geabsorbeerd werd, elke vierkante duim der aardoppervlakte in het jaar 231675 warmte-eenheden van de zon zoude ontvangen, dat is, eene genoegzame hoeveelheid warmte om eene de aarde omgevende ijslaag van bijna 31 ellen te doen smelten. Neemt men nu in aanmerking, dat de aarde slechts $\frac{1}{233000000}$ van de geheele zonnewarmte, die zich gelijkelijk naar alle kanten verspreidt, ontvangt, dan kan men zich eenig denkbeeld maken van de ontzaggelijke hoeveelheid warmte, die door de zon wordt medegedeeld.

Uit de onderzoekingen van Buys Ballot (1846) en uit latere van Secchi (1852) is gebleken, dat niet alle deelen van de oppervlakte der zon evenveel warmte uitstralen. Eerstgenoemde heeft namelijk uit de waarnemingen der luchttemperatuur afgeleid, dat de zon gemiddeld na verloop van 27,68 dagen steeds weder een gedeelte harer oppervlakte naar de aarde keert, dat evenveel warmte uitstraalt.

235. **Eigene warmte der aarde.** — Dat de aarde eene eigene warmte bezit blijkt terstond, wanneer men tot zekere diepte onder hare oppervlakte doordringt. Hoe dieper men komt, des te hooger temperatuur treft men onder den bodem aan. Uit waarnemingen van Reich, von Humboldt, Walferdin en anderen heeft men afgeleid, dat de toename der temperatuur ongeveer 1° voor elke 30 ellen diepte bedraagt. Hieruit volgt, zooals dan ook tegenwoordig algemeen wordt aangenomen, dat het binnenste der aarde in eenen vloeibaar gloeijenden toestand verkeert. De dikte van de harde korst der aarde kan niet veel meer dan 40 kilometers, dat is $\frac{1}{150}$ van den straal der aarde, bedragen; daar volgens bovengemelde onderstelling op die diepte reeds eene temperatuur moet heerschen, bij welke alle bekende stoffen smelten.

Het is duidelijk, dat deze inwendige warmte der aarde niet zonder invloed

kan zijn op de temperatuur der aardkorst; die invloed is echter slechts zeer gering, wegens het geringe geleidingsvermogen van de stoffen, waaruit die korst is zamengesteld. Waarschijnlijk bedraagt de temperatuurverhooging aan de oppervlakte der aarde uit dien hoofde niet meer dan $\frac{1}{38}$ van een graad. Door uitstraling gaat echter warmte verloren; doch ook dit verlies is gering in vergelijking der warmte, die daarin nog voorhanden is. Volgens Fourier bedraagt het verlies door uitstraling in eene eeuw niet meer dan eene hoeveelheid warmte, die noodig zoude zijn, om eene de aarde omringende ijslaag van 3 ellen te doen smelten.

236. **Temperatuur der lucht.** — De beide opgenoemde bronnen van warmte zijn oorzaak van de temperatuur der lucht; een gedeelte der zonnewarmte wordt, zooals wij gezien hebben, door de lucht geabsorbeerd, een ander gedeelte wordt door de aarde teruggekaatst of straalt van haar uit; ook een gering gedeelte van de eigene warmte gaat door uitstraling op de lucht over. Daar de beide laatste oorzaken minder werking moeten hebben, naarmate men zich verder van de oppervlakte der aarde verwijdert, zoo moet ook de temperatuur der lucht afnemen, naarmate men zich hooger bevindt. Dit wordt door de ondervinding bevestigd; de wet, volgens welke die vermindering plaats heeft, is echter nog niet met juistheid bekend. Wij hebben reeds vermeld (108), dat Gay-Lussac op eene hoogte van 7000 ellen eene temperatuur van —10° waarnam, terwijl die aan de oppervlakte der aarde 30° was; het verschil bedroeg dus 40°. Als eene der redenen, waarom de hoogere luchtlagen kouder zijn, moet ook nog vermeld worden, dat de lucht daar veel ijler is, en dus minder warmte absorbeert.

In den laatsten tijd heeft men meermâlen getracht de temperatuur te berekenen van de ruimte buiten de aarde, waarin zich de hemelligchamen bewegen. Zonder ons bezig te houden met eene verklaring der proefnemingen, hoofdzakelijk in het werk gesteld om te bepalen, welk gedeelte van de warmte der lucht moet toegeschreven worden aan de deeltjes van den dampkring, en welk gedeelte zijne oorzaak vindt in de temperatuur der ruimte zelve, vermelden wij hier alleen, dat Pouillet door zorgvuldige waarnemingen en scherpzinnige redeneringen er toe gekomen is, om voor de temperatuur der ledige ruimte ongeveer —142°C aan te nemen.

De temperatuur der lucht aan de oppervlakte der aarde is zeer verschillend; zij hangt af van het uur van den dag en van den tijd van het jaar, van de meerdere of mindere helderheid des dampkrings, en vooral van de ligging der plaats. Al deze omstandigheden staan echter in een naauw verband met den stand der zon, zoodat het eigenlijk deze is, die moet beschouwd worden als den meesten invloed op de luchttemperatuur uitoefenende. Hoe meer de hoek,

onder welken de zonnestralen op de aarde invallen, tot een regten hoek nadert, des te meer warmte deelen zij haar mede. Daarom is de warmte aan de polen veel geringer dan aan den evenaar; daaruit, in verband met de verandering in stand van de aardas, verklaart men de afwisseling der jaargetijden. Eindelijk is hierin ook de oorzaak gelegen van de toename in warmte van den opgang der zon af tot aan den middag, en van het verminderen der temperatuur, naarmate de zon lager komt. Men moet hierbij echter ook in aanmerking nemen, dat de duur van de inwerking der zonnestralen eenen zeer merkbaren invloed uitoefent; men neemt dan ook de hoogste temperatuur niet waar op den middag, maar, naar gelang van het jaargetijde, een tot drie uren later; evenzoo is ook niet de maand Junij, in welke de dagen het langst zijn en de zon het hoogst boven den horizon komt, de warmste, maar Julij of Augustus.

Door gemiddelde temperatuur van eenen dag verstaat men het gemiddelde van 24 waarnemingen, die van uur tot uur op eene zelfde plaats gedaan worden. Evenzoo noemt men gemiddelde temperatuur van het jaar, de gemiddelde van alle gedurende het geheele jaar waargenomen gemiddelde temperaturen van den dag. Zijn deze waarnemingen gedurende verscheidene jaren voortgezet, dan kan men daaruit de normale gemiddelde temperatuur eener plaats afleiden. Zoo heeft men bijv. voor de gemiddelde temperatuur van Parijs uit 30jarige waarnemingen afgeleid 10°,67. Eenige der resultaten door Buys Ballot (1856) afgeleid uit veeljarige waarnemingen op verschillende plaatsen in Nederland gedaan, zijn in de volgende tafel bevat, waarin men door winter de maanden December, Januarij en Februarij, door lente Maart, April en Mei, door zomer Junij, Julij en Augustns, door herfst September, October en November moet verstaan.

Namen der plaatsen.	Gemiddelde normale temperatuur van				
	den winter.	de lente.	den zomer.	den herfst.	het geheele jaar.
Groningen.	1,63	9,06	17,57	10,50	9,69
Leeuwarden.	1,87	9,05	17,36	10,30	9,64
den Helder.	3,16	9,30	17,87	11,21	10,38
Zwanenburg.	2,33	8,94	17,07	10,81	9,79
Utrecht.	2,28	10,00	18,54	10,54	10,34
Nijmegen.	2,13	9,59	18,28	10,31	10,08
Breda.	2,47	10,22	18,39	10,93	10,50
Maastricht.	2,47	10,20	18,44	11,09	10,55

Uit deze tafel blijkt, dat de gemiddelde temperatuur niet alleen afhankelijk is van den breedtegraad, daar noordelijker plaatsen dikwijls eene hoogere gemiddelde temperatuur hebben dan andere, die een weinig zuidelijker liggen. De ondervinding leert, dat de gesteldheid van het land, en vooral de nabijheid van bergen, van zeeën of zelfs van groote rivieren daarop een merkbaren invloed uitoefenen.

Vereenigt men alle plaatsen in een zelfde halfrond, die eene even hooge gemiddelde temperatuur hebben, door eene lijn, *isothermische* lijn genoemd, dan zal men bevinden, dat deze lijnen noch onderling, noch met den evenaar evenwijdig loopen. Volgens von Humboldt is de gemiddelde temperatuur onder den evenaar 27°,7; latere onderzoekingen hebben evenwel ook plaatsen onder den evenaar doen kennen, waar zij 29° en zelfs 32° bedraagt. De temperatuur aan de pool heeft men natuurlijk niet kunnen waarnemen. Parry vond op het eiland Melville eene gemiddelde temperatuur van — 18°,5; Scoresby daarentegen vond nog noordelijker, op eene breedte van 78°, slechts — 9°.

Het is moeijelijk om juist te bepalen, welke de uiterste temperaturen zijn, die men aan de oppervlakte der aarde kan waarnemen. Black heeft in het noorden van Amerika eene temperatuur van — 56°,7 waargenomen. Ritchie zag daarentegen in Afrika den thermometer klimmen tot 54°. Voor ons land kan men als maximum aannemen 36°, als minimum — 22°.

De gang van de temperatuur gedurende den dag is zeer verschillend naar gelang van den tijd van het jaar. Voor onze streken kan men aannemen, dat het minimum doorgaans invalt een half uur of een uur vóór zonsopgang; in den zomer heeft het maximum des namiddags omstreeks half vier plaats, in den winter omstreeks 2 uur.

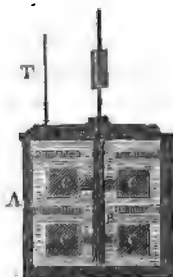
237. **Warmteontwikkeling door mechanische middelen.** — Warmte kan opgewekt worden door verschillende mechanische middelen, die van eene verplaatsing der moleculen gepaard gaan. In de eerste plaats is dit het geval bij die bewerkingen, welke eene gedaanteverandering van het ligchaam ten gevolge hebben, zoo als smeden, pletten, draadtrekken en dergelijke. Een smid kan een koud ijzer alleen door het te slaan gloeijend maken; eene looden staaf kan men op gelijke wijze tot smelten brengen.

Een niet minder belangrijk middel tot warmteontwikkeling is de wrijving. Worden twee ligchamen over elkander gewreven, dan worden beide warm, en wel des te warmer, naarmate de tegenstand aanzienlijker is. Aldus kan men twee stukken hout, alleen door ze tegen elkander te wrijven, aan het branden maken. De bruine strepen op sommige op de draaibank vervaardigde

houten voorwerpen worden gemaakt, door ze in eene schielijke draaijende beweging te brengen, en dan een stuk hard hout er tegen te drukken. De daardoor ontwikkelde warmte is aanzienlijk genoeg om het hout in de punten van aanraking te doen verkoolen. Davy deed twee stukken ijs smelten, alleen door ze tegen elkander te wrijven, terwijl de temperatuur der lucht beneden 0° was. Wanneer een rijtuig in beweging is, worden de assen warm, en het is om de wrijving te verminderen en dus ook de warmteontwikkeling, dat men ze smeert. Een mes tegen een ronddraaijenden slijpsteen gehouden wordt zeer warm; om dit eenigzins te voorkomen houdt men den steen vochtig. Sommige stoffen, zoo als phosphorus, ontvlammen terstond, als zij langs een eenigzins ruw ligchaam gestreken worden. Slaat men met een stuk staal tegen een vuursteen, dan vliegen er vonken af; deze vonken zijn niets anders dan kleine stukjes staal, die door den harden steen aan het staal ontnomen en door de wrijving gloeijend geworden zijn.

Het is moeijelijk naauwkeurig de hoeveelheid warmte te bepalen, die door wrijving ontwikkeld wordt. Rumford heeft te dien einde eenige proeven gedaan, en bevonden, dat er bij het boren van een kanon eene ontwikkeling van 2500 warmte-eenheden had plaats gehad, toen 250 wigtjes van het metaal uitgeboord waren. Beaumont en Mayer (1855) hebben een toestel vervaardigd, bestaande uit een afgeknotten houten kegel, die met eene snelheid van 400 omwentelingen in de minuut in een hollen koperen kegel ronddraaide; deze toestel was geplaatst in een bak met 400 kannen water van 10°, dat binnen weinige uren eene temperatuur van 130° verkregen had, alleen door de warmte, welke door de wrijving werd ontwikkeld.

Fig. 216.



Ook door wrijving van vloeistoffen kan warmte ontwikkeld worden. Joule (1850) liet in een met water gevulden bak A (Fig. 216) om eene as B een vleugelrad C schielijk draaijen, en nam na verloop van eenigen tijd eene geringe verhooging van temperatuur bij het water waar. Bij kwikzilver was de temperatuurverhooging veel aanzienlijker.

Dat ook bij wrijving van gassen tegen vaste ligchamen warmte ontwikkeld wordt, blijkt uit de waarneming, dat een kogel, die zich snel door de lucht beweegt, warm wordt. Aan dezelfde oorzaak schrijft men ook de gloeihitte der meteoorsteenen en vallende sterren toe.

Een derde mechanisch middel om warmte te ontwikkelen is de zamendrukking. Wordt een stuk metaal gemunt of geplet, dan wordt het warm. Ook bij zamendrukking van vloeistoffen wordt eene geringe temperatuurverhooging

waargenomen. Het merkbaarste is zij echter bij gassen, zoo als wij reeds hebben opgemerkt, toen wij boven (85) van de spankracht van deze gesproken hebben. De warmte, die bij de aldaar vermelde proef door de zamenpersing der lucht ontwikkeld wordt, is aanzienlijk genoeg om een stukje zwam, dat zich in het cilindertje bevindt, te doen ontbranden, hoewel daartoe eene temperatuur van meer dan 300° vereischt wordt. Laat men omgekeerd een gas, dat zamengedrukt is, zich weder uitzetten, dan neemt men eene merkbare afkoeling waar. Heeft men bijv. vochtige lucht in een vat zamengeperst en laat men haar dan door eene kleine opening in den wand uitvloeijen, dan zal de daarbij plaats hebbende uitzetting der lucht met eene zoo aanzienlijke vermindering van temperatuur gepaard gaan, dat water in ijs verandert. Beide deze verschijnselen, warmteontwikkeling door zamenpersing en afkoeling door uitzetting van lucht, komen volkomen overeen met de hierboven (198) vermelde proef van Clément en Désormes, die een gas, dat zich had uitgezet, plotseling tot zijn oorspronkelijk volume terugbragten, en uit de daarbij waargenomen temperatuurverhooging de betrekking tusschen de soortelijke warmte bij standvastige drukking en die bij standvastig volume afleidden. Op grond van de door hen genomen proeven kunnen wij gemakkelijk nagaan wat er moet gebeuren, wanneer eene zekere massa lucht verwarmd wordt. Stellen wij eenvoudigheidshalve, dat zich in eenen cilinder, wiens grondvlak eene vierkante el bedraagt, eene kubieke el lucht van 0° bevindt, terwijl ook de buitenlucht denzelfden warmtegraad heeft. Is de lucht in den cilinder A (Fig. 217) door eenen naauwsluitenden zuiger B van de buitenlucht afgesloten, dan zal zij dezelfde spanning hebben als de dampkring, indien ten minste de zuiger door middel van een tegenwigt P belet wordt door zijn gewigt eene drukking op haar uit te oefenen. Onderstellen wij nu, dat de zuiger op de eene of andere wijze is vastgemaakt, zoodat hij zich niet opwaarts kan bewegen, en dat men de lucht in A, om 't even op welke wijze, verwarmt, dan zal deze trachten zich uit te zetten; daar zij dit echter niet kan, zal hare spanning vermeerderen. Uit de vroeger opgegeven getallen kan men berekenen, hoeveel warmte-eenheden men noodig zal hebben om die lucht tot eene temperatuur van 100° te brengen; men zal daarvoor ongeveer 22 vinden. Neemt men echter de beletselen weg, die de beweging van den zuiger verhinderden, dan zal de lucht in A zich terstond uitzetten en den

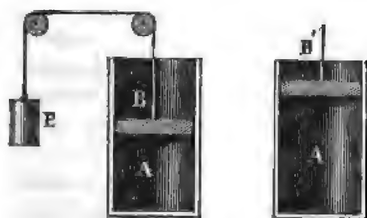
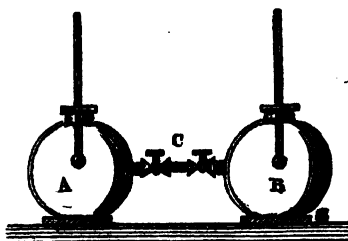


Fig. 217.

zuiger opligten; maar deze uitzetting gaat gepaard met afkoeling. Wil men de lucht in A onder deze omstandigheden, dat is bij standvastige drukking, tot 100° verwarmen, dan is er meer warmte noodig; bij berekening zal men vinden, dat daartoe nog ongeveer 9 warmte-eenheden behalve de reeds aangewende 22 moeten worden aangewend. De zuiger zal zich dan in den stand B′ bevinden, die evenzeer als B een evenwigtstoestand zal zijn, daar in beide gevallen de drukking onder en boven ééne atmospheer bedraagt. Wordt nu de zuiger weer naar beneden gedrukt, zoodat hij in den stand B komt, dan zal de temperatuur der lucht toenemen, en wel tot zoodanige temperatuur, als aan haar zoude zijn gegeven, indien de aangewende 31 warmte-eenheden waren aangebragt zonder dat de zuiger zich had kunnen bewegen, dat is tot nagenoeg 141°; herneemt de zuiger weder den stand B′, dan zal de temperatuur weder tot 100° dalen.

Alvorens tot eene nadere beschouwing dezer verschijnselen over te gaan, moeten wij nog eene door Gay-Lussac in 't werk gestelde proef vermelden, die hiermede in een naauw verband staat. Hij nam namelijk twee van thermometers voorziene bollen van gelijken inhoud A en B (Fig. 218), die door eene met kranen voorziene buis C verbonden waren. Den bol A maakte hij luchtledig, terwijl B met een gas gevuld werd. Nadat hij zich overtuigd had, dat de beide thermometers gelijke temperaturen aanwezen, opende hij de kranen in C, zoodat het gas uit B in A stroomde en zich gelijkelijk in beide verspreidde. Aan den thermometer in B werd eene daling, bij A daarentegen eene even groote rijzing waargenomen, zoodat de gemiddelde temperatuur niet veranderd was. Joule heeft later dezelfde proef herhaald, door twee onderling verbonden koperen bollen, waarvan de een luchtledig en de ander met lucht van 22 atmospheren gevuld was, onder water te houden en daarna de kranen te openen; het bleek hem, dat bij de uitzetting der lucht in dit geval geene verandering in de temperatuur van het water werd waargenomen, zoodat hier, even als bij de proef van Gay-Lussac, volkomen compensatie plaats moest hebben tusschen de afkoeling in den eenen en de verwarming in den anderen bol.

Fig. 218.



238. °**Mechanische theorie der warmte.** — Wanneer wij de zoo even vermelde verschijnselen met elkander vergelijken, dan vertoont zich schijn-

baar eene tegenstrijdigheid. Terwijl toch uit verschillende waarnemingen, onder anderen uit de proef van Clément en Désormes blijkt, dat uitzetting van lucht met afkoeling gepaard gaat, zoo had zulks bij die van Gay-Lussac en Joule niet plaats. Eene verklaring daarvan kunnen wij in de theorie, welke de warmteverschijnselen aan eene warmtestof (150) toeschrijft, niet vinden. Volgens die theorie toch gaat bij verwarming eene zekere hoeveelheid warmtestof in het verwarmde ligchaam over; hoe meer warmtestof in eene zelfde ruimte bevat is, des te hooger temperatuur zal men waarnemen; bij uitzetting zal dus, daar die warmtestof zich dan over eene grootere ruimte verspreidt, de temperatuur moeten dalen. Dit bleek ook het geval te zijn bij de proef, die wij door fig. 217 hebben getracht aanschouwelijk te maken. Bij de vermelde proeven van Gay-Lussac en Joule zoude echter volgens die theorie eene temperatuur-vermindering moeten zijn waargenomen. De in den eenen bol opgesloten lucht verspreidde zich in beide bollen; er had dus uitzetting plaats en de warmtestof moest zich dus over eene dubbele ruimte verspreiden. De lucht in beide bollen moest dus eene lagere temperatuur verkregen hebben, en toch werd dit slechts in den eenen waargenomen, terwijl zelfs bij den anderen eene rijzing plaats had. De waarneming van deze natuurkundigen kan dus in de warmtestof-theorie hare verklaring niet vinden.

Beschouwen wij nu de omstandigheden, waarmede de warmteverschijnselen in de beide gemelde gevallen, uitzetting *met* afkoeling en uitzetting *zonder* afkoeling, gepaard gaan, dan zal het niet moeijelijk vallen, de oorzaak van dit onderscheid aan te wijzen. In al die gevallen toch, waar de uitzetting afkoeling ten gevolge heeft, wordt een zekere arbeid volbragt. Stroomt zamengeperste lucht in den dampkring, dan oefenen de deeltjes van den dampkring zelven eenen tegenstand uit, welke moet overwonnen worden. De verplaatsing dier luchtdeeltjes is het volbrengen van eenen arbeid. Bij de uitzetting der lucht in den cilinder A′ (Fig. 217) wordt eveneens een tegenstand overwonnen, namelijk de drukking van den dampkring op de oppervlakte van den zuiger; ook hier wordt een arbeid volbragt, of beter gezegd, hier wordt een arbeidsvermogen daargesteld, doordat de zuiger wordt opgeligt; men zal dat arbeidsvermogen kunnen uitdrukken, door de drukking van den dampkring op den zuiger te vermenigvuldigen met den door hem afgelegden weg, als hij van den stand B tot den stand B′ overgaat. Bij de proeven daarentegen met den in fig. 218 afgebeelden toestel stroomde de lucht niet in den dampkring uit, maar in het luchtledige; daar was dus geen tegenstand te overwinnen, er werd geen arbeid volbragt en geen arbeidsvermogen daargesteld. Wij komen daarom tot het besluit, dat wanneer bij uitzetting

van lucht eene temperatuurvermindering plaats heeft, er tevens arbeidsvermogen voortgebragt wordt. Er gaat dan wel warmte verloren, maar er komt arbeidsvermogen voor in de plaats; warmte wordt dus als 't ware omgezet in arbeidsvermogen.

Ook deze eigenschap kan niet behoorlijk verklaard worden, zoo men warmte beschouwt als het gevolg van eene eigenaardige warmtestof, die van het eene ligchaam in het andere overgaat; in dat geval toch zoude men moeten aannemen, dat die warmtestof bij de uitzetting vernietigd wordt, terwijl arbeidsvermogen uit niets wordt voortgebragt; het een zoowel als het ander zoude in strijd zijn met de thans algemeen aangenomene beginselen van het behoud van stof en van het behoud van arbeidsvermogen (56). Die zwarigheid wordt echter weggenomen, wanneer men warmte en arbeidsvermogen beschouwt als gelijksoortige grootheden, waarvan de eene in de andere kan worden omgezet. Door zoodanige wijze van beschouwing wordt tevens eenig licht verspreid over den aard der warmte. Arbeidsvermogen kan niet daargesteld worden zonder beweging, het onderstelt een bewegingstoestand; warmteontwikkeling moet dus ook het gevolg zijn van beweging, en warmte behoort dientengevolge als een bewegingstoestand beschouwd te worden, zoo als wij reeds hiervoor (150) hebben opgemerkt. Deze wijze van voorstelling komt ook overeen met hetgeen wij hebben medegedeeld aangaande de verschillende mechanische middelen om warmte te ontwikkelen; in al die gevallen werd arbeid verrigt, en ging dus arbeidsvermogen verloren, terwijl er warmte voor in de plaats kwam.

De aard van die beweging, die zich aan ons als warmte vertoont, is moeijelijk met naauwkeurigheid aan te wijzen. Men schijnt het echter er voor te mogen houden, dat het eene trillende beweging is, hetzij van de kleinste stofdeeltjes zelven, hetzij van eene alom verspreide uiterst ijle stof, wier trillingen, zoo als wij later zien zullen, tevens als de oorzaak van de lichtverschijnselen beschouwd worden. Hoe dit ook zijn moge, in allen gevalle moet omzetting van warmte in arbeidsvermogen of omgekeerd aangemerkt worden als verandering van den aard der beweging, en als overgang van eene zekere hoeveelheid beweging van het eene ligchaam op het andere.

Zonder in vele bijzonderheden te treden, om de tot dusverre beschouwde warmteverschijnselen te toetsen aan de mechanische warmtetheorie (zooals men gewoon is de hier ontwikkelde theorie te noemen), willen wij echter nog op enkele de aandacht vestigen. Wij hebben vroeger (114) reeds opgemerkt, dat gassen door vaste ligchamen kunnen geabsorbeerd worden en dat daarbij eene aanzienlijke warmteontwikkeling plaats heeft, zooals onder anderen het geval is met platinaspons, waarop een stroom van waterstofgas wordt geleid. Het lijdt echter geen twijfel, of het gas bevindt zich alsdan in

eenen anderen, waarschijnlijk in eenen sterk verdigten toestand; men kan dan aannemen, dat er eene verandering in de onderlinge betrekking der moleculen heeft plaats gehad, en dat er dus in werkelijkheid een arbeid verrigt en een arbeidsvermogen verbruikt is, waarvoor warmte is in de plaats gekomen. Pouillet heeft aangetoond, dat bij alle absorptie van vloeistoffen door vaste ligchamen warmte ontwikkeld wordt, ook dan wanneer er geene scheikundige werking plaats heeft. Ook absorptie van gassen door vloeistoffen gaat met warmteontwikkeling gepaard.

De verschijnselen der latente warmte kunnen ook door middel van de mechanische warmtetheorie worden verklaard. De warmte, die bij den overgang van een vast ligchaam in eene vloeistof of van deze in een gas gebonden wordt, moet dan inderdaad als verdwenen of vernietigd beschouwd worden. Schijnbaar is dit in strijd met het hierboven gezegde; men moet echter aannemen, dat ook hier de warmte is omgezet in arbeidsvermogen. Bij den overgang toch van vaste ligchamen in vloeibare en van deze in gasvormige heeft er eene aanmerkelijke wijziging in de moleculaire krachten plaats, welke tusschen de deeltjes dier stoffen werkzaam zijn; onze onbekendheid met den aard dier krachten maakt het ons echter onmogelijk om aan te wijzen, waarin die wijzigingen bestaan. Dat er echter bij zoodanigen overgang een arbeidsvermogen wordt voortgebragt in plaats van de verdwenen warmte, kan men uit eene vergelijking van de eigenschappen eener vloeistof met die van een gas, zooals water en stoom, afleiden; laatstgenoemde toch oefent stellig op de wanden van een vat, waarin hij is opgesloten, eene drukking uit, welke men bij de vloeistof niet in die mate waarneemt; het gas bezit dan ook een veel grooter arbeidsvermogen dan de vloeistof.

De gewone mededeeling van warmte laat zich verklaren als eene voortplanting der beweging van het eene stofdeeltje tot de naastbijgelegene; de uitstraling echter, welke, voor zoover dit uit de proeven is gebleken, ook in het luchtledige plaats heeft, kan bezwaarlijk verklaard worden, tenzij men ook eene trillende beweging aanneemt van eene stof, welke ook daar aanwezig is, waar wij met de ons ten dienste staande middelen een zoogenaamd luchtledig hebben daargesteld. Het is dan ook voornamelijk om die reden, dat men heeft aangenomen, dat warmte moet beschouwd worden als bewegingstoestand van eene overal verspreide en uiterst ijle stof, die men *ether* genoemd heeft. Bij de behandeling van het licht komen wij nader hierop terug. Intusschen mag men niet uit het oog verliezen, dat de mechanische warmtetheorie nog nieuw is, en dat er dus nog wel eenige tijd zal verloopen, eer men zal hebben kunnen slagen om van alle verschijnselen eene volledige verklaring te geven.

239. Mechanisch aequivalent der warmte. — Zijn warmte en arbeidsvermogen gelijksoortige grootheden, waarvan de eene in de andere kan worden omgezet, dan laat het zich verwachten, dat die omzetting steeds in eene bepaalde verhouding plaats heeft, en dat men dus uitdrukkelijk kan aanwijzen in hoeveel arbeids-eenheden eene zekere hoeveelheid warmte kan overgaan. Die betrekking, waaraan men den naam van *mechanisch aequivalent der warmte* (1) heeft gegeven, heeft men inderdaad op verschillende wijzen opgespoord, waarvan wij hier echter slechts enkele kunnen vermelden. Joule perste door middel van eene perspomp de lucht in eenen koperen cilinder tot eene drukking van 22 atmospheren zamen. Deze cilinder was geplaatst in een bak met eene bepaalde hoeveelheid water, waarin zich thermometers bevonden. De ontwikkelde warmte kon dus daaraan worden waargenomen, terwijl ook de verrigte arbeid bekend was, daar zoowel de drukking op den zuiger der perspomp op ieder oogenblik, als de door dien zuiger doorloopen weg kon bepaald worden; daarbij moest echter tevens acht gegeven worden op den arbeid, die noodig was om de wrijving te overwinnen, en op de warmte, die door die wrijving ontwikkeld werd. Langs dezen weg, die echter tot geene zeer naauwkeurige uitkomsten kon leiden, vond Joule voor het warmte-aequivalent eene waarde van 443,8 kilogrammeters; dat wil zeggen, dat 443,8 arbeids-eenheden werden omgezet in ééne warmte-eenheid. Eene tweede methode, volgens welke dezelfde natuurkundige deze bepaling deed, was de volgende. Hij liet twee in een bak met water van eene bepaalde temperatuur gedompelde ijzeren platen tegen elkander wrijven door de eene zeer snel te doen omdraaijen; deze beweging werd er aan medegedeeld, door om de spil, waarop deze plaat bevestigd was, een koord te winden, dat over eene katrol liep en aan welks uiteinde een gewigt bevestigd was. Hier kon dus het arbeidsvermogen, verloren door de daling van het gewigt, naauwkeurig bepaald worden, terwijl de temperatuurverhooging van het water de hoeveelheid ontwikkelde warmte aanwees. Op deze wijze vond Joule, dat eene warmte-eenheid overeenkomt met 482 arbeids-eenheden. De zorgvuldigste proeven zijn door hem

(1) Montgolfier schijnt in het begin dezer eeuw reeds de onderlinge betrekking tusschen mechanischen arbeid en warmte gegist te hebben; bij het algemeene geloof aan eene warmtestof vonden zijne denkbeelden echter weinig ingang. Later (1824) heeft ook Carnot zich daarmede bezig gehouden, doch zijn vermoeden, dat de warmte slechts door de stoomwerktuigen heenging en dat dus alle warmte in den stoom moest teruggevonden worden, als hij uit den cilinder kwam, is sedert gebleken ongegrond te zijn. Séguin is een der eersten geweest, die in Frankrijk heeft te kennen gegeven, dat arbeid bij de stoomwerktuigen steeds het gevolg is van een verlies van warmte. De eerste, die duidelijk het bestaan van een mechanisch warmte-aequivalent heeft uitgesproken, was Mayer (1842). Joule was echter de eerste, die het naauwkeurig bepaalde; daarna hebben ook Thomson, Rankine, Regnault, Clausius en anderen zich daarmede beziggehouden.

in het werk gesteld met den in fig. 216 afgebeelden toestel, welke eveneens door middel van een om den spil gewonden koord met een nederdalend gewigt verbonden was. Deze gaven hem, indien de bak met water gevuld was, eene waarde van 423,9; voor hetzelfde vleugelrad in kwikzilver draaijende vond hij 424,7 kilogrammeters.

Bij de vermelde proeven geschiedde de bepaling van het warmte-aequivalent door na te gaan, hoeveel warmte voor eene zekere hoeveelheid arbeid in de plaats komt. Ook langs den tegenovergestelden weg kan zijne waarde gevonden worden, door namelijk na te gaan, hoeveel arbeidsvermogen in de plaats treedt voor eene bepaalde hoeveelheid verbruikte warmte. Dit laatste kan ook door berekening afgeleid worden uit de proef, die wij door fig. 217 hebben getracht aanschouwelijk te maken.

Noemen wij het gewigt van de in het vat A bevatte lucht p; om die lucht te verwarmen tot eene temperatuur t zijn $pc't$ warmte-eenheden noodig, indien de lucht, zoo als in de eerste figuur, zich niet kan uitzetten, doch pct, indien het volume kan toenemen; c' en c drukken hier even als vroeger (198) de soortelijke warmte uit, de eerste bij standvastig volume, de laatste bij standvastige drukking. Om den zuiger van den eersten tot den tweeden stand in fig. 217 te brengen zijn dus $pct - pc't = p(c - c')t$ warmte-eenheden noodig. Door deze warmte wordt een zekere arbeid verrigt, namelijk het opligten van den zuiger, waarop de dampkring drukt. Die arbeid kan worden uitgedrukt, door de oppervlakte van den zuiger, die wij d zullen noemen, te vermenigvuldigen met den afgelegden weg. Die weg wordt gevonden, door de hoogte h van den zuiger B boven den bodem van den cilinder A in den eersten stand met de temperatuur t en den uitzettings-coefficient α van de lucht te vermenigvuldigen. Is d uitgedrukt in vierkante ellen, dan bedraagt de drukking op den zuiger 1,0334 d ponden, en de verrigte arbeid is dus $10334 d \times \alpha h t$. Noemt men nu het warmte-aequivalent A, dat is, onderstelt men dat eene warmte-eenheid wordt omgezet in A arbeids-eenheden, dan zal diezelfde arbeid ook kunnen worden voorgesteld door de formule $Ap(c - c')t$, zoodat wij zullen hebben

$$Ap(c - c') = 10334\, \alpha d h.$$

Neemt men nu aan, dat h eene el en d eene vierkante el bedraagt, dan zal $p = 1{,}2936$ pond zijn; daar voorts $\alpha = 0{,}003665$, $c = 0{,}2377$ en $c' = \frac{c}{1{,}408} = 0{,}1688$ is, zoo zal men uit deze formule vinden $A = 424{,}9$ arbeids-eenheden of kilogrammeters, welke waarde zeer goed overeenstemt met de door Joule en anderen uit hunne proefnemingen afgeleide. De overeenkomst tusschen deze langs verschillende wegen verkregene uitkomsten kan wel als eene beves-

tiging gelden van de beginselen, van welke men bij de berekening is uitgegaan.

Passen wij de hier gevonden uitkomsten toe om na te gaan, welk gedeelte van de warmte, die in den stoom is overgegaan, bij de stoomwerktuigen in arbeid wordt omgezet. Onderstellen wij in de eerste plaats een stoomwerktuig van lage drukking, waarin stoom van ééne atmospheer, dus van 100°, werkt; nemen wij voorts eenvoudigheidshalve aan, dat de oppervlakte van den zuiger eene vierkante el en de lengte van den zuigerslag 1,694 el bedraagt, dan zal de inhoud van den cilinder 1,694 kub. ellen bedragen. Om den zuiger een slag te doen volbrengen zijn dus 1694 kannen stoom van 100° noodig, en deze worden, zoo als wij (221) gezien hebben, door één pond water voortgebragt. De hoeveelheid warmte, noodig om een pond water van 0° tot stoom van 100° te maken, bedraagt blijkens het vroeger (219) medegedeelde 637 warmte-eenheden (1). Bij elken zuigerslag zijn dus in zoodanig werktuig 637 warmte-eenheden noodig; en daar elke warmte-eenheid in 425 arbeids-eenheden kan worden omgezet, zoo bedraagt de arbeid, die theoretisch zoude kunnen verrigt worden, 637 × 425 = 270725 kilogrammeters. De arbeid, die inderdaad door den zuiger verrigt wordt, is veel geringer; men vindt dien door de drukking op den zuiger te vermenigvuldigen met de lengte van den zuigerslag. De drukking op den zuiger bedraagt 10334 pond, wanneer wij eenvoudigheidshalve de tegendrukking, door onvolkomen condensatie veroorzaakt, verwaarloozen; de afgelegde weg is 1,694 el; de verrigte arbeid bedraagt dus nagenoeg 17500 kilogrammeters. Vergelijkt men dit getal met het boven gevondene, dan bevindt men, dat slechts ruim $\frac{1}{16}$ verrigt wordt van den arbeid, die zou kunnen volbragt worden, indien alle warmte in arbeid werd omgezet.

Beschouwen wij een stoomwerktuig van hooge drukking, waarin de stoom met expansie werkt, dan verkrijgen wij minder ongunstige uitkomsten. Stellen wij, dat de cilinder dezelfde afmetingen heeft als de zoo even vermelde, en dat men stoom gebruikt van 4 atmospheren, dien men gedurende $\frac{1}{4}$ van den zuigerslag met vol vermogen en daarna door expansie laat werken. Uit hetgeen hiervoor (231) dienaangaande is gezegd volgt, dat de werking ongeveer dezelfde zal zijn, als wanneer de stoom gedurende den geheelen slag met eene drukking van nagenoeg 2,4 atmosphèren had gewerkt. De verrigte arbeid wordt dus uitgedrukt door 2,4 × 10334 × 1,694 of nagenoeg 42000 kilogram-

(1) Wij mogen hier niet onopgemerkt laten, dat het water in den ketel niet van 0° af behoeft verwarmd te worden, vooral indien men dien voedt met warm water uit den condensor. Het verschil oefent echter op de bovenstaande berekeningen geen grooten invloed uit; wij hebben ons daarom bij dit en het volgende voorbeeld bij de eenvoudiger onderstelling gehouden, dat steeds water van 0° in stoom van de bedoelde spanning moet worden veranderd.

meters. De hoeveelheid verbruikte stoom moet bij het einde van den zuigerslag, wanneer de spanning eene atmospheer zal bedragen, weder 1694 kan van 100° bedragen; zij wordt dus voortgebragt door een pond water, dat echter niet tot 100°, maar tot 144°, de temperatuur van stoom van 4 atmospheren, moet verwarmd worden; daartoe zijn volgens de tabel op bladz. 308 ongeveer 650 warmte-eenheden noodig. Vermenigvuldigt men dit getal met het mechanisch warmte-aequivalent 425, dan zal het product, 276250 kilogrammeters, den arbeid aanduiden, die door den stoom van 4 atmospheren kan worden voortgebragt. In dit geval zal dus ruim $\frac{1}{7}$ van den theoretischen arbeid verrigt worden.

Hoewel dus de verhouding bij de stoomwerktuigen van hooge drukking met expansie gunstiger is dan bij die van lage drukking, zoo wordt toch in beide gevallen slechts een betrekkelijk gering gedeelte van den beschikbaren arbeid verbruikt. De stoom, die in den condensor zijne warmte grootendeels afgeeft, zoude nog nuttigen arbeid kunnen verrigten. Daarom heeft men aan sommige stoomwerktuigen eene bijzondere inrigting gegeven, waardoor de stoom, na in den cilinder gewerkt te hebben, nogmaals in een tweeden cilinder werkt. Men heeft ook wel van de warmte, die nog aanwezig was in den stoom, welke reeds gewerkt had, gebruik gemaakt om eene vloeistof, die bij eene veel lagere temperatuur kookt, zoo als zwavelether, in damp te doen overgaan, en dezen damp dan op gelijke wijze als de stoom te laten werken. In den laatsten tijd heeft men ook middelen uitgedacht, om den stoom, nadat hij op den zuiger gewerkt heeft, op nieuw te verwarmen, waartoe dan slechts weinig warmte noodig is, en hem dan weder in denzelfden cilinder te laten werken.

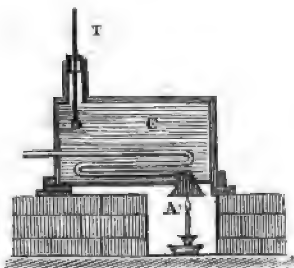
240. **Warmteontwikkeling door scheikundige werking.** — Schenkt men water en sterk zwavelzuur bij elkander, dan ontstaat er warmte; gebrande kalk, waarop men water giet, verkrijgt insgelijks eene hooge temperatuur. De oorzaak van deze warmteontwikkeling, of zoo als men het somtijds noemt, van dit vrijworden van warmte, is slechts daarin gelegen, dat er eene scheikundige verbinding plaats heeft; er worden namelijk zoogenaamde *hydraten* (waterverbindingen) gevormd. In de hier opgenoemde voorbeelden, even als in eene menigte andere, verbinden zich de bij elkander gebragte stoffen bij de gewone temperatuur; bij andere geschiedt dit niet, maar zijn er bijzondere omstandigheden noodig, opdat de verbinding kan plaats hebben. Brengt men bijv. zwavel en kopervijlsel bij elkander, dan verbinden zij zich niet; maar is eenmaal op één punt de scheikundige werking begonnen tengevolge van eenige van buiten aangebragte warmte, dan wordt weldra het geheele mengsel gloeijend,

en er wordt zwavelkoper gevormd; bij de verbinding heeft eene aanzienlijke ontwikkeling van warmte plaats, veel grooter dan die welke noodig was, om de scheikundige werking te doen aanvangen. Zuurstof en waterstof verbinden zich onder gewone omstandigheden niet; een vonkje is echter voldoende om ze in water te veranderen, waarbij dan eene aanzienlijke warmteontwikkeling wordt waargenomen.

Eene der belangrijkste scheikundige verbindingen is de gewone verbranding, welke eigenlijk slechts eene verbinding van zoogenaamde brandbare stoffen met zuurstof is. Kool, waterstof, verbindingen van deze beide grondstoffen onderling en eene menigte organische stoffen, zoo als olie, vet, stearine, behoeven slechts aangestoken te worden, om onder gestadigen toevoer van zuurstof of van lucht te blijven voortbranden; bij die verbranding wordt dan steeds eene aanzienlijke hoeveelheid warmte ontwikkeld. Het is dus alleen door scheikundige verbinding en de daardoor ontwikkelde warmte, dat wij des winters onze kamers verwarmen.

Talrijke proeven zijn in het werk gesteld om met juistheid de hoeveelheid warmte te bepalen, die bij verschillende scheikundige verbindingen en vooral bij de verbranding ontwikkeld wordt. De eerste waren die van Lavoisier en Laplace (1780) met hunnen hierboven (193) beschreven calorimeter, waarin zij eene gewogene hoeveelheid van de te onderzoeken stof lieten verbranden. Later (1814) werden die onderzoekingen herhaald door Rumford, die zich bediende van den in fig. 219 afgebeelden toestel, welke bestaat uit een met water gevulden en van een thermometer voorzienen koperen bak C, waarin zich eene koperen slang bevindt. Aan het uiteinde van deze bij A bevindt zich een omgekeerde trechter, waaronder de stof verbrand wordt. De door de verbranding ontwikkelde warmte gaat dan door de koperen slang, door wier wanden zij nagenoeg geheel wordt opgenomen en zich aan het water mededeelt. Uit het klimmen van den thermometer T en de bekende soortelijke warmte van het water kan dan de hoeveelheid opgenomen warmte berekend worden. Despretz en Dulong hebben later deze onderzoekingen voortgezet; de belangrijkste uitkomsten zijn echter die, welke Favre en Silbermann sedert 1844 hebben verkregen door middel van meer zamengestelde toestellen, die met de meest mogelijke zorg waren vervaardigd, en waarbij zij getracht hebben alle schadelijke invloeden te vermijden. Daaruit is duidelijk gebleken, dat hoe sterker de

Fig. 219.



scheikundige verwantschap tusschen twee ligchamen is, des te grooter warmte-ontwikkeling er bij de verbinding plaats heeft. Volgens hen worden door de verbinding van één pond zwavelzuur (SO_3, HO) met één aequivalent water 64,7 warmte-eenheden ontwikkeld; één pond kalk en één aequivalent water geven 669 warmte-eenheden. Bij de verbranding van een pond der hieronder opgenoemde stoffen wordt eene hoeveelheid warmte ontwikkeld, aangeduid door de daarnaast geplaatste getallen, die alle door Favre en Silbermann bepaald zijn, behalve die voor steenkool, coke, hout en turf, waarvoor het moeijelijk is naauwkeurige opgaven te doen, omdat de bij de verbranding dier stoffen ontwikkelde warmte afhankelijk is van de gebruikte soort; de hier vermelde gelden voor de beste soorten.

Waterstofgas	34462	Steenkool	7600
Ligt koolwaterstofgas	13068	Alcohol	7184
Zwaar koolwaterstofgas	11858	Coke	6600
Terpentijnolie	10852	Hout (droog)	3600
Zwave	9027	Turf	3000
Houtskool	8080	Kooloxyd	2403
Diamant	7770	Zwavel	2259.

De warmte-ontwikkeling door scheikundige werking laat zich door middel van de mechanische warmte-theorie op eene vrij eenvoudige wijze verklaren. Scheikundige verwantschap toch is eene aantrekkingskracht tusschen ongelijksoortige deeltjes (22); zijn bijv. zuurstof (O) en waterstof (H) met elkander in aanraking, dan trekken de deeltjes O en H als 't ware elkander krachtens hunne affiniteit aan. Wordt er nu onder gunstige omstandigheden eene scheikundige verbinding (HO) gevormd, dan gaat deze werking met eene verplaatsing of beweging der deeltjes gepaard; er wordt dus arbeid verrigt en er gaat arbeidsvermogen verloren. De kracht, de verwantschap, bestaat niet meer; zij is verdwenen, of beter gezegd, er is warmte voor in de plaats gekomen; men kan dus zeggen, dat in dit geval scheikundig arbeidsvermogen is omgezet in warmte. Hieruit volgt verder, dat zoo men onder geschikte omstandigheden warmte aanbrengt op water, dit weder moet ontleed worden; daarbij wordt dan wel warmte geabsorbeerd, maar er wordt arbeidsvermogen voortgebragt, want de beide grondstoffen, zuurstof en waterstof, treden weder met hare oorspronkelijke verwantschap te voorschijn.

Dat bij scheikundige ontleding warmte wordt geabsorbeerd is uit proefnemingen gebleken. Favre en Silbermann hebben aangetoond, dat de hoeveelheid warmte, die bij de ontleding eener zamengestelde stof wordt opgenomen, juist even groot is als die, welke bij de verbinding dier grondstoffen wordt

ontwikkeld. Wij vinden dus, wanneer wij de scheikundige werking uit dit oogpunt beschouwen, ook daarin weder een bewijs van het beginsel van het behoud van arbeidsvermogen.

241. **Ontwikkeling van warmte bij de levensverrigtingen der dieren.** — Het is eene aan ieder bekende daadzaak, dat door het leven van menschen en dieren voortdurend warmte ontstaat. De oorzaak van die warmteontwikkeling moet gezocht worden in de scheikundige werkingen, welke in het dierlijk ligchaam plaats hebben. Vroeger meënde men, dat alle warmte bij de ademhaling in de longen ontstaat, en dat zij vandaar door het bloed in het ligchaam verspreid wordt; thans echter is men tot de overtuiging gekomen, dat in het geheele ligchaam warmteontwikkeling plaats heeft ten gevolge van scheikundige verbinding met het ingeademde zuurstofgas, dat door het bloed door het geheele ligchaam wordt rondgevoerd.

De dieren worden, uit het oogpunt der bij hunne levensverrigtingen ontwikkelde warmte beschouwd, verdeeld in warmbloedige en koudbloedige. Bij de eersten is de temperatuur van het ligchaam standvastig en onafhankelijk van die der omgevende lucht; bij den mensch bedraagt zij tusschen 36° en 37°; bij sommige dieren is zij aanzienlijker, bij de vogels doorgaans 42°. Bij de koudbloedige dieren, waartoe de amphibiën, visschen, weekdieren, enz. behooren, is de temperatuur afhankelijk van die der hen omgevende middenstof.

Uit onderzoekingen van Dutrochet is het gebleken, dat ook bij het plantenleven warmte ontwikkeld wordt, hoewel in veel geringer mate dan bij het dierlijk leven; bij het kiemen is de verhooging van temperatuur het merkbaarst. Ook hier schijnt de oorzaak in scheikundige werking gezocht te moeten worden.



HOOFDSTUK VIII.

ELECTRICITEIT EN MAGNETISME.

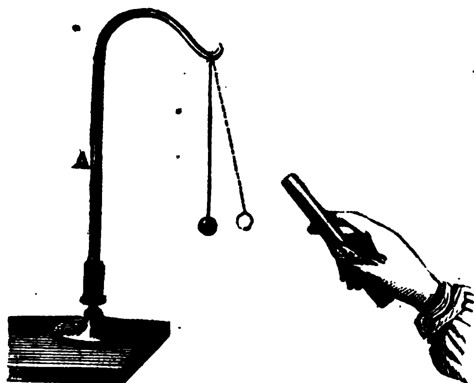
A. WRIJVINGS-ELECTRICITEIT.

242. **Eenvoudigste verschijnselen der electriciteit.** — Wordt eene glazen staaf of eene stang van lak of zwavel met eene wollen of zijden lap of met een kattevel gewreven, en brengt men haar dan in de nabijheid van kleine stukjes papier, veêrtjes of andere ligte voorwerpen, dan worden deze door de stang aangetrokken, doch terstond daarna met kracht er van afgestooten. Is de stang sterk gewreven, en brengt men haar in een donker vertrek in de nabijheid van een metalen voorwerp of van de hand, dan ziet men eene kleine vonk overspringen, die in het laatste geval met een stekend gevoel in de hand gepaard gaat.

De verschijnselen, hier in haren eenvoudigsten vorm voorgesteld, zijn datgene, wat men *electriciteit* noemt. De naam is afkomstig van den griekschen naam van barnsteen (*electron*), welke stof in hooge mate dezelfde eigenschap bezit. Reeds ten tijde van Thales (600 jaren v. Chr.) was men met deze eigenschap van den barnsteen bekend.

243. **Geleiders en niet-geleiders der electriciteit.** — Duidelijker nog dan door de zoo even vermelde proef kan men de aantrekking door electriciteit aantoonen door middel van den eenvoudigen in fig. 220 afgebeelden toestel, waaraan men den naam van *electroskoop* heeft gegeven. Deze bestaat uit eene op een voetje bevestigde glazen stang A, waaraan door middel van een zijden draad een balletje van vlierpit is opgehangen. Houdt men eene met laken gewreven lakstang in de nabijheid van dit balletje, dan wordt het onmiddellijk aangetrokken. Zoodra het echter de lakstang heeft aangeraakt, wordt het als 't ware daarvan afgeworpen; brengt men dan nogmaals de stang tot het balletje, dan heeft er geene aantrekking meer, doch afstooting plaats. Brengt men daarna eene metalen staaf in de nabijheid van

het balletje, dan wordt het daardoor wel aangetrokken, maar een oogenblik later valt het er van af, en heeft blijkbaar alle eigenschappen verloren, die het door aanraking met de lakstang had verkregen.


Fig. 220.

Heeft men in plaats van den zoo even beschreven electroskoop een anderen, welke uit eene metalen stang bestaat, waaraan het balletje door middel van een draad van vlas of hennep is opgehangen, dan wordt dit ook wel door de gewreven lakstang aangetrokken, maar niet afgestooten. Na weinige oogenblikken verlaat het wel de stang, maar dan hebben blijkbaar alle electrische verschijnselen opgehouden.

Uit deze schijnbaar eenvoudige proeven kan men zeer belangrijke gevolgtrekkingen afleiden. In de eerste plaats volgt er uit, dat sommige ligchamen de eigenschap bezitten van de electriciteit verder te leiden, terwijl andere die missen. Terwijl toch het aan den zijden draad opgehangen balletje de electriciteit, die het van de lakstang ontvangen had, behield, verloor het balletje, dat aan den linnen draad bevestigd was, die terstond. Evenzoo werd de electriciteit door den glazen standaard niet voortgeleid, doch wel door den metalen. Glas en zijde zijn dus niet-geleiders der electriciteit; vlas, hennep en metaal geleiden haar wel.

Met het oog op dit onderscheid kan men alle stoffen in twee soorten onderscheiden, namelijk geleiders en niet-geleiders. Tot de eersten behooren alle metalen, potlood, kool, zuren, zoutoplossingen, water, waterdamp, het dierlijk ligchaam, de planten; tot de niet-geleiders moeten gerekend worden schellak, hars, barnsteen, was, zwavel, glas, diamant, elastieke gom, guttapercha, zijde, wol, porselein, drooge lucht en gassen. De naam van niet-geleiders is echter niet volkomen juist; alle stoffen toch hebben, al is het dan ook in zeer geringe mate, de eigenschap om de electriciteit te geleiden; men drukt zich dus juister uit, als men van goede en slechte geleiders spreekt. Daar nogtans meestal van geleiders en niet-geleiders gesproken wordt, zoo zullen wij ook in 't vervolg die namen gebruiken.

De ligchamen, die de electriciteit goed geleiden, nemen die bij aanraking met

een electrisch ligchaam gemakkelijk op. Zijn zij onmiddellijk of door middel van andere goede geleiders met den grond verbonden, dan verspreidt de electriciteit zich aanstonds in de aarde, die zoowel wegens de stoffen, waaruit zij is zamengesteld, als door haren vochtigen toestand, een goede geleider is. Daarom verspreidde de electriciteit in het vlierpitballetje, dat op den metalen standaard was geplaatst, zich terstond verder. Bij den in fig. 220 afgebeelden electroskoop daarentegen beletten de glazen standaard en de zijden draad, dat de electriciteit verder voortgaat; zij blijft in het vlierpitballetje, dat dus door de zijde en het glas als 't ware afgescheiden of geïsoleerd is van den grond. Duidelijk blijkt deze eigenschap ook nog door de volgende proef. In eene glazen buis wordt eene kurk gestoken, waarin zich een koperdraad met koperen bolletje bevindt, zoo als in fig. 221 is afgebeeld. Wordt nu de glazen buis A met laken gewreven, dan neemt het koperdraad BC terstond de daardoor ontstane electriciteit op, waarvan men zich kan overtuigen door den toestel in de nabijheid van een electroskoop te houden. Het is op grond van deze eigenschappen, dat men de slechte geleiders ook wel aanduidt door den naam van *isolatoren*. Door van deze gebruik te maken kan men dus de electriciteit in eene stof eenigen tijd bewaren en hare eigenschappen naauwkeuriger waarnemen. Men behoeft het ligchaam daartoe slechts op een glazen voet te plaatsen of op een ander voorwerp, dat uit een der bovengenoemde slechte geleiders is vervaardigd. Daarbij moet men echter zorg dragen, dat die isolatoren volmaakt droog zijn, daar vocht een zeer goede geleider is. Men gebruikt daarom veelal de voorzorg van die glazen voorwerpen te verwarmen, ten einde voor te komen, dat er zich waterdamp uit den dampkring op afzet. Wordt het menschelijk ligchaam op de eene of andere wijze electrisch gemaakt, dan plant zich de electriciteit terstond op de aarde over; plaatst men zich op een bankje met glazen pooten, isoleerbankje genaamd, dan blijft men geruimen tijd in den electrischen toestand.

Fig. 221.

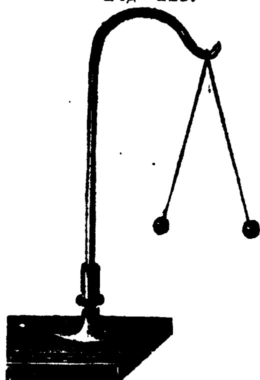


De reden, waarom slechts enkele stoffen door wrijving electrisch kunnen gemaakt worden, moet ook in dezelfde eigenschap gezocht worden. Wrijft men eene lakstang of eene glazen staaf met laken, dan wordt alleen het gewreven gedeelte electrisch; het gedeelte, dat men in de hand houdt, verkrijgt geene electriciteit, omdat glas en lak slechte geleiders zijn. Wrijft men daarentegen eene metalen staaf, dan is het wel waarschijnlijk, dat daardoor ook electriciteit wordt opgewekt, maar daar èn het metaal èn het menschelijk ligchaam beide goede geleiders zijn, verspreidt zich de electriciteit, naarmate zij wordt opgewekt, en men bespeurt er dus niets van. Wij

hebben echter zoo even gezien, hoe men door eene gepaste verbinding van een geleider met eenen niet-geleider, zoo als in fig. 221 is afgebeeld, ook eerstgenoemden electrisch maken kan.

244. **Positieve en negatieve electriciteit.** — De eenvoudige proef met de electroskoop heeft ons nog een ander verschijnsel doen opmerken; wij zagen namelijk, dat het vlierpitballetje, na door aanraking met de lakstang electrisch geworden te zijn, daarna door haar wordt afgestooten. Doet men dezelfde proef met eene glazen staaf, die men eveneens met laken gewreven heeft, dan neemt men dezelfde verschijnselen waar. Brengt men echter de glazen stang bij een balletje, dat door aanraking met de lakstang electrisch geworden is, dan heeft er aantrekking plaats; hetzelfde wordt waargenomen, wanneer eene gewreven lakstang gehouden wordt bij een balletje, dat zijne electriciteit van eene glazen staaf gekregen heeft. Deze verschijnselen kunnen niet worden verklaard, dan door twee verschillende ~~electrische~~ toestanden aan te nemen, waarvan de een verkregen wordt door glas, de andere door lak of hars met laken te wrijven. Terwijl er steeds aantrekking plaats heeft, wanneer een niet-electrisch ligchaam in de nabijheid van een electrisch voorwerp wordt gebragt, zoo is dit niet meer het geval, wanneer beide electrisch zijn; hebben namelijk beide dezelfde soort van electriciteit, dan stooten zij elkander af; zijn zij daarentegen verschillend electrisch, dan trekken zij elkaar sterk aan. Men kan zich hiervan ook overtuigen door twee electroskopen, die men electrisch maakt; hebben beide dezelfde electriciteit dan stooten de bolletjes elkander af; hebben zij verschillende, dan heeft er aantrekking plaats. Hangt men aan eenen electroskoop twee balletjes en maakt men beide te gelijk electrisch door aanraking met een zelfde geëlectriseerd voorwerp, dan blijven zij in den stand van fig. 222 staan.

Fig. 222.



Aanvankelijk heeft men aan de twee onderscheidene soorten van electriciteit den naam van *glas-electriciteit* en *hars-electriciteit* gegeven, naarmate zij door wrijving van glas of van eene harsachtige zelfstandigheid met laken zijn voortgebragt. Daar het echter later bleek, dat elk van deze ligchamen beide soorten van electriciteit kan voortbrengen, mits men slechts eene andere stof gebruikt om ze mede te wrijven, zijn die namen buiten gebruik geraakt en vervangen door de benaming van *positieve* en *ne-*

gatieve electriciteit. Eene met laken gewreven glazen staaf wordt dus positief electrisch, eene op dezelfde wijze gewreven lakstang daarentegen negatief electrisch.

Wij hebben reeds de opmerking gemaakt, dat eene zelfde stof verschillend electrisch worden kan, wanneer zij met verschillende stoffen gewreven wordt. Glas wordt positief electrisch, als het met laken of wol gewreven wordt; wrijft men het daarentegen met een kattevel, dan wordt het negatief electrisch. Hierbij is echter nog eene belangrijke zaak op te merken; wanneer twee ligchamen tegen elkander gewreven worden, dan worden beide electrisch en wel tegenovergesteld electrisch. Het laken, waardoor glas positief electrisch wordt, verkrijgt zelf negatieve electriciteit; het kattevel daarentegen verkrijgt positieve electriciteit, terwijl het glas negatief electrisch wordt. Wordt eene lakstang met laken gewreven, dan verkrijgt de stang negatieve en het laken positieve electriciteit. Men kan op grond van deze eigenschappen eene tafel zamenstellen van verschillende stoffen, die zoo op elkander volgen, dat elke der daarin voorkomende ten opzigte van de voorgaande positief, doch ten opzigte van de volgende negatief electrisch is. Eene zoodanige is de volgende:

Kattevel.
Glas.
Wol.
Hout.
Papier.
Witte zijde.
Zwarte zijde.
Zegellak.
Schellak.
Hars.
Barnsteen.
Zwavel.

Kattevel is dus positief ten opzigte van alle andere stoffen; het kan niet door wrijving negatief electrisch gemaakt worden. Hoe meer twee stoffen in deze tafel van elkander verwijderd zijn, des te sterker zal de eerste door wrijving met de tweede positief electrisch worden. Dat zich ook hier onregelmatigheden voordoen, blijkt onder anderen daaruit, dat wanneer gepolijst glas en mat glas tegen elkander gewreven worden, het eerste positief, het laatste negatief electrisch wordt. Worden twee zijden linten kruiselings over elkander gestreken, dan wordt het lint, dat over dwars gewreven wordt, negatief, het andere positief electrisch.

245. **Hypothesen aangaande den aard der electriciteit.** — Alvorens ons verder met de electrische verschijnselen bezig te houden, is het noodig eenige beschouwingen te laten voorafgaan aangaande den aard der electriciteit. Iets stelligs kan echter daaromtrent niet worden medegedeeld, en men moet zich dus bepalen tot hypothesen, waardoor men van die verschijnselen zoo goed mogelijk rekenschap tracht te geven.

Volgens die, welke het algemeenst door de natuurkundigen wordt aangenomen, onderstelt men, dat alle ligchamen eene onbepaalde hoeveelheid van eene uiterst fijne vloeistof in zich bevatten, welke is zamengesteld uit twee enkelvoudige vloeistoffen, waarvan de eene positieve electriciteit (+ E), de andere negatieve electriciteit (— E) is. In den gewonen toestand zijn deze beide vloeistoffen verbonden en oefenen dus, daar zij elkander als 't ware neutraliseren, geene werking naar buiten uit. Deze electrische evenwigtstoestand is een gevolg van de aantrekking, welke beide vloeistoffen op elkander uitoefenen. Worden zij echter door de eene of andere uitwendige oorzaak, zoo als wrijving, gescheiden, dan geraakt elke op zich zelve in werking; eene van beiden verdwijnt of gaat op een ander ligchaam over, en de andere kan zich dus vrij uiten. Zij hebben bovendien de eigenschap van zich met groote snelheid in sommige ligchamen te verspreiden, die daarom, zoo als wij zagen, goede geleiders genoemd worden; in andere, de slechte geleiders, planten zij zich slechts moeijelijk van het eene stofdeeltje op het andere over. Worden de beide electriciteiten in gelijke hoeveelheid op een ligchaam overgebragt, dan heeft er neutralisatie en dus geene werking plaats; zijn de hoeveelheden ongelijk, dan zal er van die, waarvan de hoeveelheid de grootste was, een gedeelte overblijven, dat zijne eigenaardige werkingen vertoont.

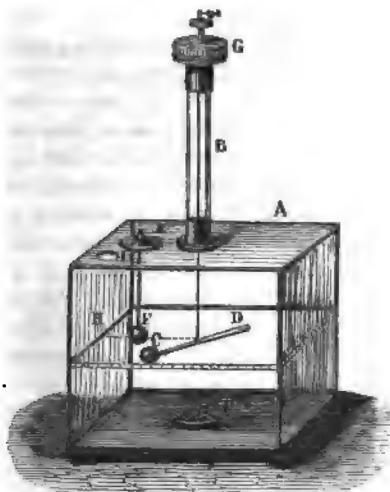
Volgens deze hypothese wordt de electriciteit beschouwd als op de stof zelve geene werking uitoefenende; de aantrekking en afstooting, die men waarneemt bij de stofdeeltjes, zijn dus eigenlijk geene eigenschappen van de stof, maar van de electrische vloeistoffen, die er mede verbonden zijn.

Hoewel de hypothese van twee uiterst fijne en onweegbare vloeistoffen bezwaarlijk kan verdedigd worden, en het vooral moeijelijk is te zeggen, welke voorstelling men zich van zoodanige vloeistoffen behoort te maken, zoo geeft toch de hier ontwikkelde theorie, die men aan Symmer verschuldigd is, het best rekenschap van de vermelde en nog verder te vermelden electrische verschijnselen, zoodat men dan ook steeds bij voorkeur van haar bij die verklaring gebruik maakt. In den laatsten tijd heeft het denkbeeld meer ingang gevonden, dat de electriciteit slechts een bijzondere bewegingstoestand is van de kleinste stofdeeltjes, of van eenen overal aanwezigen ether, zoo als wij hier boven reeds bij de warmte-theorie hebben aangenomen. Deze hypothese is echter nog niet

genoegzaam in alle opzigten toegepast, om haar nu reeds te mogen aannemen; ook heeft men nog niet kunnen slagen, om door middel van haar eene voldoende verklaring van alle electrische verschijnselen te geven.

246. **Wet der electrische aantrekking en afstooting.** — De wetten der electrische werkingen zijn het eerst bepaald door Coulomb (1785) met behulp van den in fig. 223 afgebeelden toestel. Deze bestaat uit eene glazen kast A, waarop zich eene glazen of metalen buis B bevindt. Boven in deze buis is een zeer dunne metalen draad vastgemaakt, waaraan een staafje CD van schellak in horizontalen stand is opgehangen, aan welks uiteinde C zich een vlierpitballetje bevindt, dat met goudblad bekleed is. In het deksel van de glazen kast is eene opening E gemaakt, waardoor men een dergelijk met een verguld vlierpitballetje voorzien glazen staafje EF kan steken. De lengte moet zoodanig gekozen zijn, dat de beide balletjes C en F juist tegen elkander aankomen. Ten einde de lucht in de kast zoo droog mogelijk te houden is op den bodem een bakje P met chloorcalcium of ongebluschte kalk geplaatst.

Fig. 223.



Wil men van dezen toestel gebruik maken, dan neemt men het schellakstaafje EF eerst weg, en brengt door middel van het bovenste verplaatsbaar gedeelte G van de buis B den draad met het staafje CD in zoodanigen stand, dat het balletje C juist naar het punt H gekeerd is. Door de torsie van den draad zal het in dien stand blijven, of zoo het er buiten gebragt wordt, na eenige schommelingen daartoe terugkeeren. Brengt men dan het staafje EF weder op zijne plaats, dan zullen de beide bolletjes met elkander in aanraking zijn. Daarna neemt men het een of ander geïsoleerd metalen voorwerp, waarmede men, na het electrisch gemaakt te hebben, het balletje F aanraakt; dit kan het gemakkelijkst geschieden, indien in het deksel eene tweede opening I aanwezig is, waardoor men het voorwerp tot bij F brengen kan. Door die aanraking wordt het balletje F terstond electrisch; daar zich

echter de electriciteit aanstonds ook aan het andere balletje mededeelt, verkrijgen beide dezelfde electriciteit en stooten dus elkander af; zij blijven dan na eenige schommelingen staan in den door de figuur aangewezen stand. Door middel van verdeelingen, die op de zijvlakken zijn aangebragt, kan men den hoek bepalen tusschen den oorspronkelijken stand van het staafje en dien, waarin het zich ten gevolge van de afstooting bevindt. De electrische kracht houdt de balletjes van elkander; door de wringkracht van den draad wordt C naar T gedreven; het zijn dus deze beide krachten, die evenwigt met elkander maken.

Stellen wij, dat de hoek 30° bedraagt, dan maakt dus de electrische kracht evenwigt met de wringkracht, veroorzaakt door eene omdraaijing van 30°. Om dien hoek, en dus ook den afstand der beide balletjes, tot de helft te verminderen, moet de wringkracht vermeerderd worden. Dit geschiedt door den geheelen draad door middel van den toestel G om te draaijen; de grootte dier omdraaijing kan men waarnemen aan een daarmede verbonden verdeelden cirkel of mikrometer. Men zal bevinden, dat om den afstand der balletjes tot 15° te brengen, eene omdraaijing van 105° noodig is; daar bovendien door den stand van het staafje CD de draad eene torsie van 15° heeft, zal de geheele torsie 120° bedragen. Daar volgens de wetten der wringkracht (18) die krachten evenredig zijn aan de hoeken, zal de wringkracht, die in dezen stand evenwigt maakt met de electrische afstootende kracht, viermaal grooter zijn dan in het eerste geval. Wordt dus de afstand tweemaal kleiner, dan zal de afstooting viermaal sterker zijn. Om het balletje op den driemaal geringeren afstand van 10° te brengen, zal men den mikrometer in het geheel 260° moeten omdraaijen, zoodat de torsie dan 270° bedraagt. De kracht is dus negenmaal grooter dan op den drievoudigen afstand.

Uit deze proeven, die men op veelvuldige wijze kan herhalen en wijzigen, doch die men steeds zoo schielijk mogelijk moet trachten te doen, daar in weerwil van alle voorzorgen de electriciteit der balletjes langzamerhand vermindert, kan men de wet afleiden, dat de afstootende krachten omgekeerd evenredig zijn aan de tweede magten der afstanden.

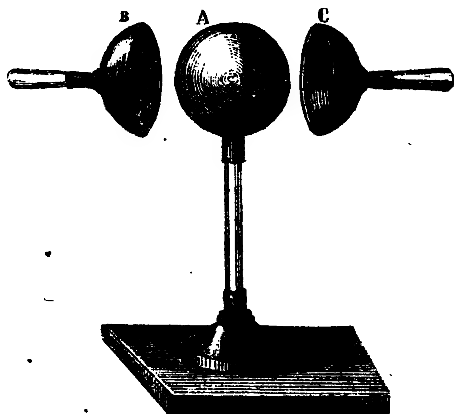
De proeven ter bepaling van de wet der electrische aantrekking geschieden op dergelijke wijze; men moet dan echter zorg dragen, dat de beide balletjes tegenovergesteld electrisch worden; in den evenwigtstoestand moet het staafje CD dan ook niet naar H, maar naar een ander punt van den omtrek gerigt zijn. Men zal aldus voor de aantrekking dezelfde wet vinden, als wij voor de afstooting hebben opgegeven, dat namelijk de krachten omgekeerd evenredig zijn aan de tweede magten der afstanden.

Het is echter niet alleen de afstand, die op de aantrekking of afstooting van

invloed is, ook de hoeveelheid der op de ligchamen opgehoopte electriciteit moet daarbij in aanmerking komen. Men kan zich daarvan overtuigen door de volgende proef. Men maakt de beide balletjes C en F op de hiervoor aangewezene wijze electrisch en neemt dan waar, hoeveel graden men den draad moet omdraaijen, om de balletjes op een bepaalden afstand, bijv. van 20° te houden. Daarna raakt men het balletje F aan met een juist even groot en van dezelfde stof vervaardigd balletje, dat niet electrisch is. Daar de electriciteit van F zich dan over beide moet verdeelen, zal F zelf slechts de helft behouden. Men zal bevinden, dat de afstand tusschen C en F en dus ook de afstooting verminderd is; om de balletjes op denzelfden afstand van 20° te brengen, zal slechts eene omdraaijing noodig zijn, die de helft van de eerste bedraagt. Had men beide balletjes, zoowel het beweegbare C als het vaste F, op gelijke wijze aangeraakt, dan zoude men bevinden, dat de afstootende kracht tot op een vierde verminderd was. Hieruit volgt dus de wet, dat op gelijke afstanden de krachten evenredig zijn aan de producten van de getallen, die de op de beide ligchamen opgehoopte hoeveelheden electriciteit uitdrukken.

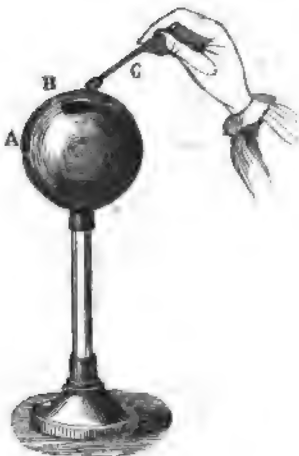
247. **Verdeeling der electriciteit in de ligchamen.** — Vervangt men in de balans van Coulomb (Fig. 223) het vaste balletje door een grooteren metalen bol, dien men electrisch gemaakt heeft, dan zal men even als bij de bovenvermelde proeven bevinden, dat hij door aanraking met een even grooten massiven metalen bol de helft zijner electriciteit verliest. Hetzelfde zal men echter ook waarnemen, wanneer men den massiven bol vervangt door een hollen, die eene even groote oppervlakte heeft. Daaruit volgt dus, dat de verdeeling der electriciteit over de beide ligchamen niet afhangt van hunne massa, maar alleen van hunne oppervlakte, en dat dus de electriciteit niet tot in het binnenste der ligchamen dringt, maar zich alleen op de oppervlakte ophoopt. Uit de volgende proeven blijkt die eigenschap nog duidelijker.

Fig. 224.



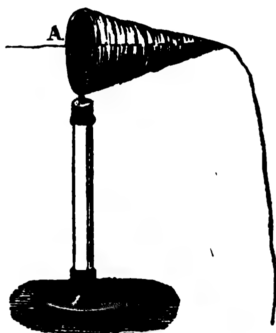
Op een glazen voet bevindt zich een metalen bol A (Fig. 224), waarop twee holle halve bollen B en C juist passen. Deze met isolerende handvatsels voorziene halve bollen drukt men zoodanig tegen den bol A aan, dat zij dien geheel insluiten. In dezen toestand maakt men den bol electrisch. Neemt men nu te gelijker tijd de beide halve bollen B en C weg, dan zal men bevinden, door ze in de nabijheid van een electroskoop te brengen, dat beide electrisch zijn, maar dat de bol A zelf zich in den natuurlijken niet-electrischen toestand bevindt. De electriciteit had zich dus alleen op de oppervlakte opgehoopt.

Fig. 225.



Op een dergelijken glazen voet plaatst men een hollen metalen bol A (Fig. 225), waarin bij B eene opening is gemaakt. Na den bol electrisch gemaakt te hebben, neemt men een zoogenaamd proefschijfje, dat is, een klein schijfje van metaal met een isolerend handvatsel, en raakt daarmede inwendig den bol aan. Men zal bevinden, dat het plaatje door die aanraking niet electrisch is geworden. Raakt men daarentegen den bol uitwendig daarmede aan, dan wordt het wel electrisch. Hieruit blijkt duidelijk, dat de electriciteit zich alleen op de buitenste en zelfs op eene zeer dunne laag bevindt.

Fig. 226.



De volgende zeer eenvoudige proef is men aan Faraday verschuldigd. Men neemt een kegelvormige gazen zak, zoo als zij tot het vangen van vlinders gebruikt worden, en waaraan men van binnen en van buiten zijden draden heeft vastgemaakt, zoo als in fig. 226 is voorgesteld. Deze zak wordt aan een metalen ring A vastgemaakt en op een glazen voet geplaatst. Heeft men hem electrisch gemaakt, dan zal men door hem met een schijfje aan te raken bevinden, dat hij van binnen niet, doch van buiten wel electrisch is. Keert men hem nu door middel van den zijden draad voorzigtig het binnenste buiten, dan

zal men vinden dat de buitenoppervlakte, die bij de eerste proef de binnenste en niet electrisch was, thans electrisch geworden is, terwijl de binnenste oppervlakte hare electriciteit verloren heeft.

Eindelijk kan men dezelfde eigenschap nog op de volgende wijze aantoonen. Om een metalen cilinder is een lint van bladtin gerold. Wordt de cilinder electrisch gemaakt en daarna het lint er afgerold, dan blijft alle electriciteit in het lint, en de cilinder zelf is geheel zonder, zoodra het lint er geheel is afgerold. Dit blijkt het gemakkelijkst, door met den cilinder een paar aan katoenen draden opgehangen en elkander aanrakende vlierpitballetjes te verbinden. Zoolang het lint opgerold blijft, zijn de balletjes electrisch en stooten dus elkander af; naarmate het echter afgerold wordt, verliezen zij hunne electriciteit en naderen eindelijk geheel tot elkander.

Uit deze proeven blijkt ten duidelijkste, dat de electriciteit zich steeds aan de oppervlakte der ligchamen bevindt. De laatste toont bovendien duidelijk, dat naarmate het oppervlak grooter wordt, de aantrekking en afstooting en dus ook de digtheid der electriciteit afnemen. Hoewel de uitdrukking *digtheid* niet als geheel juist beschouwd kan worden, daar de electriciteit eigenlijk niet als eene stof kan worden aangemerkt, maakt men er nogtans veel gebruik van; men duidt hetzelfde ook wel aan door het woord *spanning*, welke eigenlijk slechts het streven der electriciteit is om het ligchaam, waarop zij is opgehoopt, te verlaten.

Worden twee bolvormige ligchamen, waarvan slechts een electrisch is, met elkander in aanraking gebragt, dan zal de electriciteit zich over die beide ligchamen op zoodanige wijze verdeelen, dat de spanning overal dezelfde is. De hoeveelheden op die ligchamen zullen dus krachtens het aangevoerde tot elkander in verhouding staan als de oppervlakten, terwijl de massa niets ter zake doet.

248. **Invloed van de gedaante der ligchamen op de spanning van de electriciteit.** — Het is niet alleen de grootte der ligchamen, maar ook hunne gedaante, die op de verdeeling der electriciteit invloed uitoefent. Bij bollen is de spanning overal dezelfde; bij ligchamen van een minder regelmatigen vorm is zulks echter niet het geval. Men kan zich daarvan overtuigen, door die achtervolgens in verschillende punten met het geïsoleerde proefschijfje aan te raken, en de hoeveelheid der electriciteit, die daarop is overgegaan, met de balans van Coulomb te onderzoeken. Doet men dit voor een bol, dan vindt men steeds gelijke afstooting in welk punt de aanraking ook heeft plaats gehad. Is het ligchaam langwerpig, bijv. een cilinder met halve bollen aan het uiteinde, dan is de spanning der electriciteit, of zoo als men het veelal noemt, de dikte der elec-

trische laag aan die uiteinden, veel aanzienlijker dan in het midden; is het eivormig, dan hoopt de electriciteit zich het sterkst op in die punten, waar de kromming de sterkste is; de meeste spanning wordt dus aan de punt waargenomen. Hoe spitser die punt is, des te sterker zal die spanning zijn; is een ligchaam dus met eene scherpe punt voorzien, dan zal de spanning aan die punt zoo groot zijn, dat de electriciteit, die steeds een streven heeft om het ligchaam te verlaten, dientengevolge schielijk uit hetzelve stroomt.

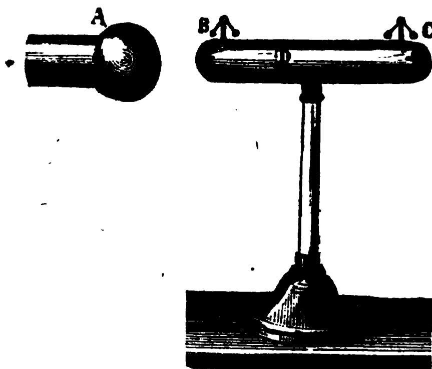
Met de theorie der verdeeling van de electriciteit op de oppervlakte van de ligchamen, welke door Poisson (1811) met uitvoerigheid behandeld is, kunnen wij ons hier niet bezig houden; het zij voldoende aan te merken, dat de hier vermelde eigenschap door hem beschouwd wordt als een gevolg van de afstooting van gelijknamige electriciteit. Het praktisch gevolg, dat men er uit kan afleiden, is dat men moet zorg dragen, dat aan ligchamen, waarop men de electriciteit zoo lang mogelijk wil bewaren, geene scherpe kanten, en vooral geene spitse punten zijn. Op de werking van deze laatste komen wij later nog terug.

249. **Verlies van de electriciteit.** — Hoewel men door het vermijden van scherpe kanten en spitse punten het verlies der electriciteit kan verminderen, zoo kan men het toch daardoor niet geheel ontgaan. Alle geïsoleerde geleiders verliezen langzamerhand de daarin opgehoopte electriciteit. In de eerste plaats moet dit daaraan worden toegeschreven, dat er geene stof is, die als volmaakt isolerend kan beschouwd worden. Maar bovendien wordt het ook veroorzaakt door de lucht, welke de geleiders omringt; Coulomb heeft opgemerkt, dat zelfs in volkomen drooge lucht de electriciteit vermindert. De spanning oefent echter op beide oorzaken van verlies een aanzienlijken invloed uit; is die sterk, dan is ook het verlies grooter. Voor zooverre de eerstgenoemde oorzaak aangaat, kan men het verlies zeer gering maken, door zich van zeer lange isolatoren te bedienen en te zorgen, dat zich op hunne oppervlakte geen vocht uit de lucht nederzet. Wij hebben reeds opgemerkt, dat dit het best geschieden kan door ze te verwarmen.

250. **Opwekking van electriciteit door verdeeling of inductie.** — Zij A (Fig. 227) een voorwerp, dat positieve electriciteit bevat, en BC een geïsoleerde niet-electrische geleider, digt aan de uiteinden met dubbele vlierpitballetjes voorzien, dan zullen deze balletjes afwijken, zoodra men BC in de nabijheid van A brengt. De geleider is dus onder den invloed van A electrisch geworden. Onderzoekt men den aard der electriciteit, dan zal men bevinden, dat BC aan het uiteinde B negatief electrisch is, en dat de elec-

triciteit vermindert, naarmate men zich van B verwijdert, tot op een punt D, waar men volstrekt geene electriciteit bespeurt; verwijdert men zich nog verder van B, dan bevindt men, dat de geleider daar weder electrisch is, maar juist de tegenovergestelde electriciteit heeft, dus in dit geval positieve, en dat deze toeneemt naarmate men meer tot C nadert. Ontneemt men aan het ligchaam A zijne electriciteit, of verwijdert men het, dan verliest de geleider BC ook aanstonds zijne electriciteit, en keert tot zijnen vorigen neutralen toestand terug. Het is dus alleen door den invloed van de op A opgehoopte electriciteit, dat BC tijdelijk electrisch geworden is.

Fig. 227.



Deze verschijnselen laten zich verklaren door de hiervoor aangenomen theorie, volgens welke zich twee soorten van electriciteit in den neutralen toestand op den geleider BC bevinden. De electriciteit in A is namelijk oorzaak, dat de beide soorten van electriciteit, die in BC aanwezig zijn, gescheiden worden; is A positief electrisch, dan wordt de negatieve electriciteit in BC daardoor aangetrokken, de positieve afgestooten. De eerste begeeft zich dus naar het uiteinde B, dat zich het digtst bij A bevindt; de andere daarentegen verwijdert zich zooveel mogelijk en vertoont zich daarom aan het tegenovergestelde uiteinde C. In verband met deze theorie zegt men, dat de geleider BC door *verdeeling* of *inductie* electrisch geworden is.

Ten gevolge van de aantrekking en afstooting moeten de beide uiteinden het sterkst electrisch zijn; naar mate men zich daarvan verwijdert, is de hoeveelheid geringer, terwijl in een daartusschen gelegen punt D geen electriciteit wordt waargenomen. Dit punt is echter, zoo als wij reeds hebben opgemerkt, niet in het midden tusschen B en C gelegen; de reden daarvan laat zich gemakkelijk aantoonen. Hoewel de hoeveelheid negatieve electriciteit in het naar A toegekeerde gedeelte even groot moet zijn als de positieve in het andere deel, daar de geleider vóór de proef in den natuurlijken toestand verkeerde, zal toch de aantrekking in B, wegens de meerdere nabijheid tot A, aanzienlijker zijn dan de afstooting in C, zoodat de electriciteit zich in B meer ophoopt dan in C. Dit blijkt ook voldoende uit de proef, daar de afwijking der vlierpitballetjes in B aanzienlijker is dan aan het andere uiteinde. Het

neutrale punt moet dus digter bij B gelegen zijn, en het zal zelfs meer en meer tot B naderen, naar mate de geleider digter bij A gebragt wordt.

Plaatst men achter BC een tweeden geleider, dan zullen de beide electriciteiten zich in dezen evenzoo onder den invloed van de in C opgehoopte electriciteit scheiden, als zulks in den eersten geschiedde door de werking van A. Op gelijke wijze kan men verscheidene geleiders achter elkander plaatsen; brengt men dan een electrisch ligchaam in de nabijheid van den eersten, dan worden alle door inductie electrisch. Hoe verder men zich echter van het electrisch ligchaam verwijdert, des te geringer zal de lading des geleiders zijn.

Het verschijnsel ondergaat eenige wijziging, wanneer de geleider BC niet meer geïsoleerd is, maar met den grond in verband wordt gebragt, hetgeen het gemakkelijkst kan geschieden door aan het van A afgewende gedeelte een koperen ketting te hangen, die tot den grond reikt, of door hem bij C met de hand aan te raken. In dit geval toch is niet alleen BC de geleider, maar ook de grond die met hem verbonden is; van daar, dat zich in B eene grootere hoeveelheid electriciteit ophoopt, en de vlierpitballetjes sterker van elkander afgestooten worden, dan wanneer de geleider geïsoleerd is. Het neutrale punt bevindt zich niet meer ergens in BC, maar daar buiten, zoodat de beide uiteinden B en C gelijke soort van electriciteit zullen verkrijgen, en wel negatieve, indien A positief electrisch is. Laat men dan de verbinding tusschen den grond en den geleider BC ophouden, dan verandert deze niet, maar behoudt de negatieve electriciteit, die steeds door de positieve in A aangetrokken wordt. Neemt men daarna ook A weg, dan blijft BC negatief electrisch, omdat nu daarin geene positieve electriciteit aanwezig is, waarmede die negatieve zich zoude kunnen vereenigen. Het eenige onderscheid bestaat daarin, dat zoolang A in de nabijheid is, het daarheen gerigte uiteinde sterker electrisch is, terwijl de electriciteit terstond na de verwijdering van A zich gelijkmatig over BC verdeelt, althans voor zoover de vorm van den geleider eene gelijkmatige verdeeling toelaat (248). Men kan dus op die wijze een ligchaam blijvend electrisch maken door inductie.

De electriciteit, die zich ophoopt in eenen met den grond verbonden geleider, welke zich in de nabijheid van een geëlectriseerd ligchaam bevindt, en niet kan ontwijken, omdat zij door de tegenovergestelde electriciteit in dat ligchaam wordt aangetrokken, wordt *gebonden* electriciteit genoemd.

Bij deze proeven moet nog opgemerkt worden, dat de electriciteit, die zich in B ophoopt, omgekeerd niet zonder uitwerking blijft op A. Door haren invloed wordt de electriciteit in A naar het naar B gekeerde uiteinde toegetrokken, waar zij zich ophoopt, zoolang de geleider in de nabijheid blijft.

251. **Mededeeling van electriciteit door aanraking.** — Wordt de geleider BC zeer digt bij het electrisch ligchaam A gebragt, dan neemt de aantrekking en dus ook de spanning, in B zoowel als in A, sterk toe. In beide tracht de electriciteit het ligchaam te verlaten, terwijl zij bovendien, ten gevolge van de wederzijdsche aantrekking, zich met elkander trachten te vereenigen. Nog voor dat er aanraking der beide ligchamen plaats heeft, kan de spanning reeds zoo aanzienlijk zijn, dat de vereeniging der beide tegenovergestelde electriciteiten plaats heeft; in dat geval gaat zij met eene vonk en een knetterend geluid gepaard. De positieve electriciteit, die zich in A bevond, of althans een gedeelte daarvan, heeft zich dus bij de aanraking, of zelfs reeds voor dat er nog volkomen aanraking plaats had, vereenigd met negatieve electriciteit in BC; de positieve electriciteit, welke aanvankelijk met die negatieve verbonden was, toen de geleider zich nog in den neutralen toestand bevond, en eerst, toen A in de nabijheid werd gebragt, zich daarvan gescheiden heeft en naar het uiteinde C gedreven werd, is nu geheel vrij geworden, en de geleider BC is dus positief electrisch geworden. Daar voorts die hoeveelheid juist even groot moet zijn als die, welke zich in A bevond, en zich met de negatieve in BC vereenigd heeft, zoo zal de uitkomst geheel dezelfde zijn, als wanneer de positieve electriciteit van A op BC door aanraking was overgegaan. Daarom zegt men, dat de electriciteit door A aan BC is medegedeeld, hoewel uit het voorgaande blijkt, dat die voorstelling niet juist is, en dat hetgeen men mededeeling noemt slechts een meer zamengesteld geval van inductie is.

Brengt men bij een electrisch ligchaam een slechten geleider, dan heeft er geene inductie op de hier beschrevene wijze plaats. Ten gevolge van de slechte geleiding worden als 't ware in ieder molecule op zich zelf de beide electriciteiten gescheiden. Dat er wel electriciteit wordt medegedeeld, kan op de volgende wijze aangetoond worden. Men neemt een harskoek en beweegt daarover in verschillende rigtingen eerst een ligchaam, dat positief electrisch is, en daarna een, dat met negatieve electriciteit geladen is. Strooit men dan op den harskoek een mengsel van menie en zwavel, dan bevindt men dat door de plaatsen, welke door het positief electrische ligchaam zijn aangeraakt, de zwavel aangetrokken wordt, terwijl de menie zich daar neêrzet, waar aanraking met het negatieve ligchaam heeft plaats gehad. Men neemt hierbij tevens waar, dat de daardoor ontstaande figuren voor de beide soorten van electriciteit niet dezelfde zijn. Die welke door positieve electriciteit ontstaan zijn, hebben talrijke vertakkingen, terwijl die van de negatieve van eene geheel andere gedaante zijn. Die figuren zijn bekend onder den naam van *figuren van Lichtenberg* (1777).

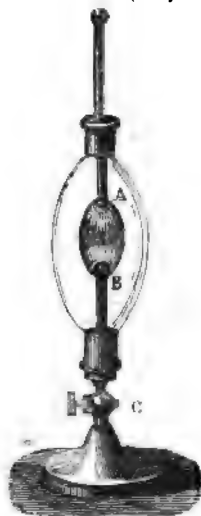
Is de spanning sterker, dan zal de vereeniging der beide electriciteiten in A en in den geleider BC ook eerder plaats hebben. Daar nu, zooals wij gezien

hebben, de spanning der electriciteit in B aanzienlijker is, als de geleider BC met den grond verbonden is, zoo moet in dit geval de vereeniging reeds op grooteren afstand plaats hebben. Dit wordt door de proef bevestigd; bij eenen geïsoleerden geleider neemt men slechts eene kleine vonk waar, wanneer er bijna aanraking plaats heeft; bij eenen niet-geïsoleerden daarentegen bemerkt men op aanzienlijker afstand eene veel grootere vonk. Het duidelijkst kan men zich daarvan overtuigen, door eenen geïsoleerden geleider, zoo als BC (Fig. 227) zoo digt bij A te plaatsen, dat bij eene meerdere toenadering de vereeniging der beide electriciteiten zoude plaats hebben. Raakt men dan met de hand den geleider aan, zoodat hij niet meer geïsoleerd is, dan springt aanstonds eene vonk over.

252. **Electrische lichtverschijnselen.** — Wij hebben gezien, dat eene electrische vonk ontstaat bij vereeniging van twee tegenovergestelde soorten van electriciteit. Wat die vonk eigenlijk is, kan moeijelijk worden aangewezen, zoolang men omtrent den aard der electriciteit nog niet tot zekerheid is gekomen; wij moeten ons dus bepalen tot een onderzoek der verschijnselen, waarmede die vonk gepaard gaat.

Men ziet de vonk gelijktijdig tusschen de beide ligchamen, zoodat men niet kan zeggen, van welk van beide zij tot het andere overspringt. Zijn die ligchamen digt bij elkander geplaatst en is de vonk dus klein, dan is zij regtlijnig; is de afstand grooter, dan is zij bogtig en vertakt, zoo als men in het groot bij den bliksem waarneemt Hare kleur is doorgaans blaauwachtig wit; soms ook is zij rood of paarsachtig; dit hangt af van de metalen, tusschen welke zij ontstaat, alsook van de gassen, waarin zij zich vertoont. Dat zij warmte veroorzaakt, blijkt daaruit, dat brandbare stoffen door haar ontvlammen, en dat de lucht, waarin zij ontstaat, zich uitzet. In het luchtledige neemt men echter geene vonk waar. Om zich hiervan te overtuigen, neemt men den in fig. 228 afgebeelden toestel, doorgaans bekend onder den naam van *electrisch ei.* Deze bestaat uit een ovalen glazen ballon, waarin zich twee metalen staven bevinden, met twee bolletjes A en B voorzien. Na er door middel van de luchtpomp de lucht uit verwijderd te hebben, sluit men de kraan C; laat men nu de vereeniging van twee electriciteiten plaats hebben door het eene bolletje met een geëlectriseerd ligchaam en

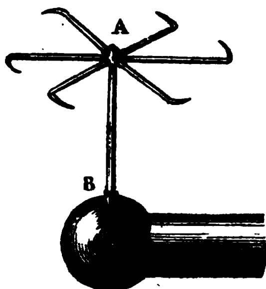
Fig. 228.



het andere met den grond te verbinden, dan bespeurt men tusschen A en B geene vonk, maar een zacht, paarsachtig licht, dat aan het negatieve bolletje het helderst is. In plaats van dezen toestel kan men zich ook van eene lange luchtledige buis bedienen, waarin aan de beide uiteinden koperen knoppen bevestigd zijn. Al is die buis ook twee ellen lang, dan ziet men telkens als er vereeniging der tegenovergestelde electriciteiten plaats heeft, over hare geheele lengte een paarsachtig licht. Deze proeven zijn vooral duidelijk, als men ze in een duister vertrek doet.

Bevinden zich aan een electrisch ligchaam punten, dan ontsnapt de electriciteit, zoo als wij reeds aangetoond hebben, door die punten in de lucht. Beschouwt men zoodanige punt in het duister, dan neemt men daaraan licht waar in den vorm van eene pluim of veêr. Is de punt positief electrisch, dan is dit licht rood gekleurd en zeer uitgebreid; voor negatieve electriciteit is de kleur donkerder en de uitgebreidheid minder groot. Houdt men de hand in de nabijheid van de punt, dan gevoelt men de beweging van de lucht, waarmede dit uitstroomen van electriciteit gepaard gaat; eene vlam van eene kaars wordt er zelfs geheel door ter zijde gekeerd. Deze beweging der lucht schijnt daaraan te moeten worden toegeschreven, dat de luchtdeeltjes door den electrischen geleider zelven electrisch worden en dien ten gevolge worden afgestooten, zoodat er als 't ware een doorgaande luchtstroom ontstaat. Om dezelfde reden zal een toestel, zooals de in fig. 229 afgebeelde, welke bestaat uit eenige met punten voorziene en onderling verbonden staafjes, die op eene punt A zeer gemakkelijk zich kunnen bewegen, aan het draaijen geraken, zoodra de geleider B electrisch wordt. Hier is het ook de afstooting tusschen de punten en de lucht, waaraan zij hare electriciteit hebben medegedeeld, welke oorzaak is van de beweging, en niet, zoo als sommigen beweren, eene dergelijke werking, als men bij het uitstroomen van vloeistoffen of gassen waarneemt (76 en 111). Zulks wordt daardoor bevestigd, dat de toestel onder eene klok weldra ophoudt te draaijen; zoodra alle in de klok aanwezige lucht electrisch geworden is, kan er geen nieuwe meer toegevoerd worden, en is dus de afstooting van alle luchtdeeltjes even groot.

Fig. 229.



Houdt men eenen geleider, bijv. de hand, in de nabijheid van eenen geëlectriseerden geleider, dan neemt men, zoo als wij zagen, eene vonk waar. Heeft men daarentegen eene metalen punt in de hand en houdt men die naar het

electrische ligchaam gekeerd, dan wordt geene vonk waargenomen. De werking is geheel dezelfde, als wanneer de punt zich op den geëlectriseerden geleider bevindt. Door inductie wordt de tegenovergestelde electriciteit in de punt opgehoopt, en door de sterke spanning, welke zij daarin verkrijgt, vereenigt zij zich reeds op aanzienlijken afstand met de electriciteit in het ligchaam zelf, zonder dat er eene vonk overspringt. Men kan dus een geleider terstond alle electriciteit laten verliezen, door eene met den grond verbonden metalen punt in zijne nabijheid te plaatsen.

253. **Beweging der ligchamen door de werking der electriciteit.** — Door middel van de beschrevene eigenschappen van de inductie der electriciteit kan ook rekenschap gegeven worden van de aantrekking en afstooting van ligte voorwerpen, welke wij bij de eenvoudige electroskopen hebben waargenomen.

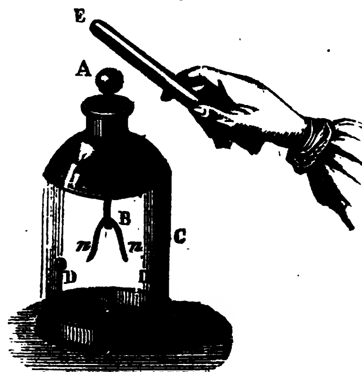
Brengt men een geïsoleerd vlierpitballetje bij een positief electrisch ligchaam, dan zal dit door inductie op het balletje werken; de beide daarin aanwezige electriciteiten worden gescheiden, en de negatieve begeeft zich naar het gedeelte, dat naar het positieve ligchaam is gekeerd. Ten gevolge van de aantrekking der beide tegenovergestelde electriciteiten, wordt dan het balletje door het ligchaam aangetrokken. Komt het daar tegen aan, dan zal het binnen weinige oogenblikken geheel positief electrisch worden, en dus weder worden afgestooten. Brengt men nu een positief electrisch ligchaam in de nabijheid, dan moet het balletje zich daarvan verwijderen. Dwingt men het echter op de eene of andere wijze op zijne plaats te blijven, zoodat men het ligchaam er zeer digt bij kan brengen, dan heeft er weder inductie plaats. Op het naar het ligchaam toegekeerde gedeelte van het balletje hoopt zich negatieve electriciteit op, wier spanning door de nabijheid van dat ligchaam zoo aanzienlijk kan worden, dat zij die van de reeds vooraf daarin aanwezige positieve electriciteit overtreft; zoodra dit het geval is, moet er aantrekking plaats hebben. Hieruit volgt dat men, wanneer men de in een vlierpitballetje of dergelijk ligchaam opgehoopte electriciteit door middel van eene lakstang of een ander geëlectriseerd voorwerp wil onderzoeken, deze niet plotseling bij het balletje moet brengen, daar men dan steeds ten gevolge der inductie aantrekking zal waarnemen, ook dan, wanneer het ligchaam met gelijknamige electriciteit geladen is. Alleen door de stang langzaam er toe te doen naderen, kan men van de juistheid der proef zeker zijn.

Is het beweegbare ligchaam een niet-geleider, dan moet men, blijkens het voorgaande, noch aantrekking noch afstooting waarnemen, daar op dat ligchaam de inductie eene andere uitwerking heeft. In de meeste gevallen zal men echter

ook bij zoodanige ligchamen aantrekking waarnemen, hetgeen alleen daaraan moet worden toegeschreven, dat zij niet als volkomen isolerend kunnen worden beschouwd.

254. **Goudblad-electroskoop.** — De hiervoor (243) beschreven electroskoop is niet voldoende om kleine hoeveelheden electriciteit aan te wijzen; daartoe zijn gevoeliger werktuigen noodig. De vorm, welke daarvoor het meest gebruikt wordt, is die van den in fig. 230 afgebeelden goudblad-electroskoop van Bennett. Deze bestaat uit eene glazen klok C, welke rust op eene metalen plaat G, die met den grond gemeenschap heeft. Van boven is de klok met eene stop gesloten, waardoor eene koperen staaf AB is gestoken, die van boven met een koperen bolletje, van onderen met twee reepjes goudblad *m* en *n* is voorzien. Op den bodem bevinden zich twee koperen met knopjes voorziene staafjes D. Om voor eene goede isolatie te zorgen, wordt het bovenste gedeelte van de klok met schellak bestreken, en daarbinnen een bakje met chloorcalcium of ongebluschte kalk geplaatst, ten einde de vochtigheid weg te nemen.

Fig. 230.



Brengt men in de nabijheid van het knopje A een electrisch ligchaam E, bijv. eene gewrevene glazen staaf, die positieve electriciteit bevat, dan wordt de geleider AB door inductie of verdeeling electrisch, en wel bij A negatief, doch in de goudblaadjes bij B positief electrisch. Die goudblaadjes zullen dus elkander afstooten en bovendien door de kolommetjes D worden aangetrokken, zoodat zij den in de figuur aangewezen stand aannemen. Raakt men nu, terwijl men de glazen staaf steeds in de nabijheid houdt, het knopje A met den vinger aan, dan zal de positieve electriciteit, die niet door de positieve in E gebonden was, zich verwijderen; alleen de gebondene negatieve blijft er in over, en daar deze zich aan het bovenste uiteinde ophoopt door de werking van E, zullen de goudblaadjes weder tot elkander naderen. Neemt men nu den vinger weg, en daarna ook de glazen staaf E, dan zal AB met negatieve electriciteit geladen zijn; de goudblaadjes stooten elkander weder af en nemen den in de afbeelding aangewezen stand aan. De electroskoop is op deze wijze door inductie geladen met de tegenovergestelde electriciteit van die, welke aanwezig was in het ligchaam, waarmede de lading heeft plaats gehad.

Houdt men nu een negatief electrisch ligchaam in de nabijheid van A, dan zullen de goudblaadjes nog meer van elkaar wijken, daar de in AB aanwezige negatieve electriciteit alsdan naar het andere uiteinde B wordt gedreven. Brengt men daarentegen een positief electrisch ligchaam bij A, dan heeft juist het tegenovergestelde plaats, en de blaadjes naderen elkander. Men kan dus aan de beweging der goudblaadjes erkennen, of een ligchaam positieve of negatieve electriciteit bevat. Daarbij moet men echter niet uit het oog verliezen, dat wanneer men een niet-electrisch ligchaam bij A brengt, de blaadjes ook tot elkander naderen, daar de in AB aanwezige negatieve electriciteit dan door inductie op dat ligchaam werkt, en zich dus door de aantrekking van de in dat ligchaam opgewekte positieve electriciteit naar het bovenste uiteinde begeeft. De proef is dus alleen afdoende in geval de goudblaadjes bij de nadering van het te onderzoeken ligchaam nog meer van elkander afwijken. Men zal echter gemakkelijk inzien, dat wanneer men het ligchaam onderzoekt aan twee electroskopen, die met tegenovergestelde electriciteit geladen zijn, het terstond moet blijken of het positief of negatief electrisch is, dan wel in den neutralen toestand verkeert.

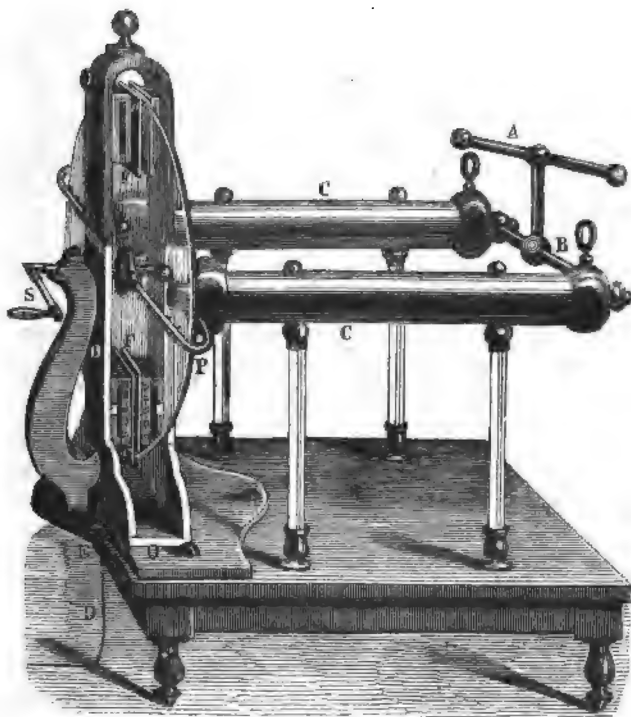
Brengt men bij den met negatieve electriciteit geladen electroskoop een positief electrisch ligchaam, dan zal men het veelal zien gebeuren, dat de goudblaadjes digter bij elkander komen, naarmate het ligchaam digter bij A gebragt wordt, en zelfs tegen elkander aankomen. Doet men het positief electrisch ligchaam dan nog digter tot A naderen, dan wijken de blaadjes weêr van elkaar, doch thans niet door de aanvankelijk daarin aanwezige negatieve electriciteit, maar ten gevolge van de door inductie daarin opgewekte positieve. Men moet daarom zorg dragen, het te onderzoeken ligchaam langzaam bij A te brengen, daar men anders, alleen op de afwijking lettende zonder acht te geven op de aantrekking der goudblaadjes, welke daaraan heeft voorafgegaan, ligt tot een besluit zoude komen, lijnregt in strijd met dat, waartoe een naauwkeuriger onderzoek zoude hebben geleid.

255. **Electriseer-machines.** — Bij de tot dusverre medegedeelde proeven hebben wij ondersteld, dat de electriciteit verkregen was door eene glazen staaf of eene lakstang te wrijven met een kattevel, een stuk laken, zijde, of dergelijke stof. Reeds sedert langen tijd echter heeft men meer of min zamengestelde werktuigen uitgedacht en vervaardigd, waardoor eene grootere hoeveelheid electriciteit kan verkregen worden. De eerste electriseermachine schijnt gemaakt te zijn door Otto von Guericke (1660); zij bestond uit een bol van gegoten zwavel, waartegen men, terwijl hij in eene snelle draaijende beweging werd gebragt, de hand hield; door die wrijving werd de bol dan

electrisch, en diende verder voor onderscheidene proefnemingen. Weldra werd de bol van zwavel door eenen glazen cilinder, en de hand door een lederen kussen vervangen; men plaatste voorts bij dien cilinder een metalen geleider, welke de electriciteit opnam. Planta (1760) was de eerste, die gebruik maakte van eene glazen schijf; na hem heeft men zich meestal daarvan bediend, terwijl men slechts in de algemeene inrigting, en vooral ook in die der kussens, waartegen die schijf wrijft, eenige verandering heeft aangebragt.

256. **Electriseer-machine van Ramsden.** — De electriseer-machines met glazen schijf worden doorgaans genoemd naar Ramsden, die er reeds in 1766 vervaardigde. Het is deze soort, die nog het meeste wordt

Fig. 231.



aangetroffen. Men ziet er eene afgebeeld in fig. 231. Deze bestaat uit eene houten tafel R, waarop zich tusschen de beide houten gestellen O eene glazen schijf bevindt, welke in haar midden bevestigd is op eene as, die door middel van de gedeeltelijk uit glas vervaardigde kruk S in beweging kan worden gebragt. Onder en boven aan de houten standaards bevinden zich lederen kussens F, waartusschen de glazen schijf zich met vrij aanzienlijke wrijving beweegt. Die kussens zijn bestreken met een week metaalmengsel, doorgaans zamengesteld uit twee deelen kwikzilver, één deel tin en één deel zink. Op de halve hoogte der schijf bevinden zich metalen met punten voorziene geleiders P, die met de grootere door glazen voeten geïsoleerde geleiders C, gewoonlijk *conductors* genoemd, verbonden zijn. Deze laatste zijn wederom door eene dwarsstang B onderling verbonden, welke even als de geleider A bewegelijk is, zoodat men dezen laatsten gemakkelijk naar eenig voorwerp kan wenden. Door de met punten voorziene conductoren, wordt de electriciteit van de glazen schijf opgenomen; zij verspreidt zich in de geleiders C, B en A, zoodat waar men deze ook nadert, hetzij met de hand, hetzij met een ander geleidend voorwerp, terstond vonken overspringen.

De in de glazen schijf door wrijving opgewekte electriciteit is positief. Deze werkt, daar hare spanning aanzienlijk is, zeer sterk door inductie op de metalen punten van P; die punten worden dus sterk negatief electrisch, en de positieve electriciteit begeeft zich naar het andere uiteinde B der conductoren. Daar voorts de negatieve electriciteit in die punten zich onophoudelijk vereenigt met de positieve in de glazen schijf, blijft er in de conductoren eene aanzienlijke hoeveelheid positieve electriciteit over. Vroeger hield men het er voor, dat de positieve electriciteit der schijf door die punten werd opgenomen; maar eene naauwkeurige kennis der inductie-verschijnselen is voldoende om het onjuiste van zoodanige meening aan te toonen.

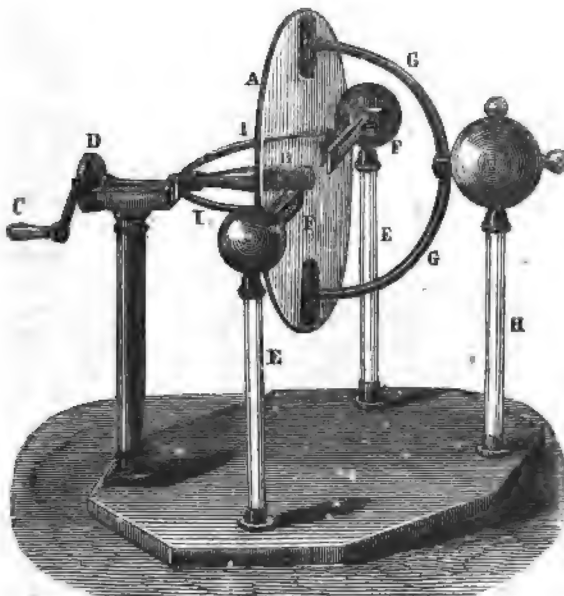
Wordt de glazen schijf positief electrisch, dan moeten de kussens F, waartegen zij gewreven wordt, negatief electrisch worden. Bleef die negatieve electriciteit daarin aanwezig, dan zoude zij de positieve in de glazen schijf neutraliseren, en de werking van het werktuig dus geringer maken. Daarom verbindt men die kussens doorgaans onderling door eene in het hout gelegde metalen reep, welke uitkomt bij een knopje E, dat door middel van een metalen kettingje met den grond verbonden is. De negatieve electriciteit der kussens wordt dus onophoudelijk in den grond afgevoerd.

Om het verlies der electriciteit zooveel mogelijk te beletten, is het noodig zorg te dragen, dat de geheele toestel en vooral de glazen deelen zoo droog mogelijk zijn. Om te voorkomen, dat de vochtigheid van de lucht daar tegen aanslaat, verwarmt men doorgaans het geheele werktuig. Bij de glazen schijf

gebruikt men nóg de voorzorg van aan de kussens stukken gewaste taf te bevestigen, die de schijf omsluiten en haar van de vochtige lucht isoleren. Deze stukken taf zijn in fig. 231 niet afgebeeld.

257. **Electriseer-machine van van Marum.** — De zoo even beschrevene machine van Ramsden geeft positieve electriciteit; wel kan men ook negatieve verkrijgen door die op te vangen, welke in de kussens wordt opgewekt, doch daartoe is het werktuig eigenlijk niet ingerigt. De electriseer-machines van van Marum daarentegen zijn zoodanig, dat men daarmede naar verkiezen positieve en negatieve electriciteit kan verkrijgen. Zulk een werktuig is afgebeeld in fig. 232. Het bestaat uit eene glazen schijf A, welke aan het uiteinde eener horizontale as B vastgemaakt is; aan het andere uiteinde, waar zich de kruk C bevindt, is een tegenwigt D bevestigd. Op twee glazen voeten E bevinden zich de kussens F, tusschen welke de glazen schijf zich kan bewegen; G is de conductor, die eveneens door den glazen voet H geïsoleerd is. Aan de as bevindt zich nog eene tweede stang I, in de gedaante van eenen halven cirkel, die echter niet met de as mede draait, maar zich vrij daarom bewegen kan, en dus in verschillende standen geplaatst kan worden. In de afbeelding is die stand zoodanig, dat hij tegen de kussens aankomt. Deze zijn dan door middel van die stang in verbinding met den grond, zoodat de negatieve electriciteit van deze in den grond verloren gaat, terwijl de positieve op den conductor G werkt, op gelijke wijze als wij voor het werktuig van Ramsden verklaard hebben.

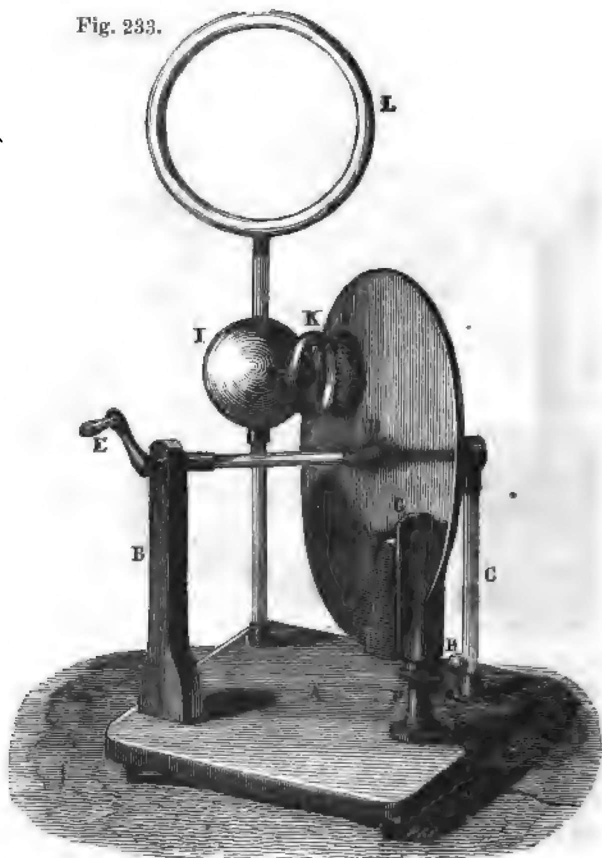
Fig. 232.



Wordt daarentegen de stang I in eenen vertikalen stand geplaatst, doch G in eenen horizontalen, zoodat deze met de kussens verbonden is, dan zal de positieve electriciteit door I worden opgenomen en in den grond verdwijnen, terwijl de conductor G de negatieve van de kussens overneemt.

258. **Electriseer-machine van Winter.** — Eenvoudige doch zeer sterk werkende machines zijn in de laatste jaren vervaardigd door den werktuigkundige Winter te Weenen. In fig. 233 is er eene voorgesteld. Op den houten voet A bevinden zich twee standaards, een houten B en een glazen C,

Fig. 233.



op welke de uit glas vervaardigde as van de schijf D rust, die door middel van de kruk E in beweging wordt gebragt. Op een glazen voet F bevinden zich twee met het bovengemelde metaalmengsel bestreken lederen kussens G, tusschen welke de glazen schijf D zich kan bewegen. Aan elk van deze kussens bevindt zich een stuk gewaste taf, die bovendien met eene schellak-oplossing bestreken is; de stukken taf, die zich aan weêrszijden van de schijf bevinden, zijn echter niet even groot. Aan een knopje H wordt een metalen kettingje bevestigd, om de kussens met den grond in verbinding te brengen. De conductor heeft bij deze soort van werktuigen een geheel eigenaardigen vorm. Hij bestaat uit een bol I van koperblik, die op een glazen voet bevestigd is, en waarmede twee houten ringen K, gewoonlijk van lindeboomenhout vervaardigd, verbonden zijn. Aan de binnenkant dier ringen, zooverre zij voorbij de glazen schijf heenreiken, is een gootje gemaakt, dat met bladtin belegd is, en waarin eene menigte fijne stalen punten gestoken zijn. Dit gootje is eveneens door middel van eene reep bladtin, die op het hout gelegd is, met de bol I verbonden. Boven op dien bol wordt een groote houten ring L geplaatst, waarin zich over zijne geheele uitgestrektheid een metaaldraad bevindt.

Even als bij de machine van Ramsden, wordt de conductor positief electrisch. De houten ring schijnt de oorzaak te zijn, dat zich eene groote menigte electriciteit in den conductor kan ophoopen, en dat er zeer weinig verloren gaat door vereeniging met de negatieve electriciteit op de kussens. Eene machine van Winter met eene schijf van ongeveer eene halve el middellijn kan vonken geven van 2 tot 3 palm lengte. Een naar hetzelfde stelsel vervaardigd werktuig te Weenen, geeft vonken van nagenoeg eene nederlandsche el.

De algemeen bekende electriseer-machine op Teyler's museum te Haarlem, welke volgens het stelsel van van Marum vervaardigd is, geeft vonken ter lengte van 65 duim; zij heeft twee glazen schijven, die een middellijn van ruim 16 palm hebben, en moet door vier man in beweging gebragt worden. De grootste electriseer-machine volgens het stelsel van Ramsden bevindt zich aan het Polytechnisch Instituut te Londen; hare schijf bedraagt bijna 23 palm in middellijn, en wordt door een klein stoomwerktuig in beweging gebragt; de werking van dit werktuig overtreft nog die van het Haarlemsche.

259. **Stoom-electriseer-machine van Armstrong.** — Eene der krachtigste electriseer-machines is die van Armstrong, welke echter op een geheel ander beginsel berust. De electriciteit wordt daarbij wel is waar ook door wrijving opgewekt, maar op eene andere wijze, daar hier niet glas, hars, of een dergelijk vast ligchaam door wrijving electrisch wordt gemaakt, maar stoom, die met kracht uit eene naauwe opening ontsnapt.

Armstrong (1845) had toevallig ontdekt, dat de stoom, die uit eene barst in een stoomketel ontsnapte, electrisch was, zoowel als de ketel zelf. Hij zelf en Faraday hebben dit verschijnsel naauwkeurig onderzocht, en zijn tot het besluit gekomen, dat bij de uitstrooming van volkomen droogen stoom of van drooge lucht geene ontwikkeling van electriciteit plaats heeft, doch alleen dan, wanneer de stoom of de lucht met waterdeeltjes vermengd is. In dit geval wordt de stoom zelf positief en de opening, waaruit hij stroomt, negatief electrisch, indien het water ten minste volkomen zuiver is. Bevat het zouten opgelost, dan is er geene of althans slechts geringe werking; is het vermengd met vette of olieachtige zelfstandigheden, dan is de werking omgekeerd, zoodat de stoom negatief electrisch wordt. De stof, waaruit de opening is gemaakt, oefent ook eenen aanzienlijken invloed uit. De meeste electriciteit verkrijgt men, als die van palmhout is vervaardigd, minder als zij van metaal en bijkans geene als zij van ivoor is.

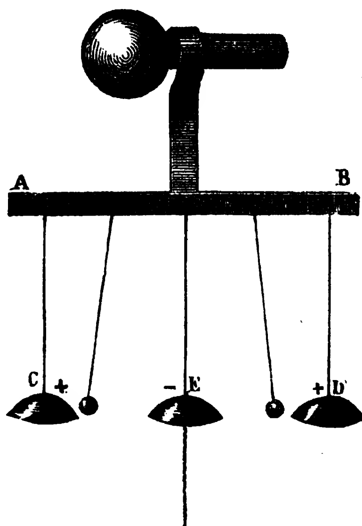
De electriseer-machine van Armstrong bestaat doorgaans uit een op vier glazen voeten rustend cilindervormig stoomketeltje, dat van binnen gestookt wordt, en waarboven zich eene buis bevindt met eene kraan, waardoor men den stoom kan laten uitstroomen. De hiermede verbondene eigenlijke uitstroomings-buizen, zijn gewoonlijk zes in getal en van palmhout vervaardigd; zij zijn zoo ingerigt, dat de stoom gedwongen wordt langs een scherpen kant van dezelfde houtsoort te strijken. Deze buizen zijn naast elkander geplaatst in een bakje, waarin zich water bevindt, ten einde den stoom eenigzins te doen condenseren, en hem dus waterdroppels te doen medenemen. Den uitstroomenden stoom laat men aankomen tegen verscheidene scherpe metalen punten, die met eenen conductor verbonden zijn. Bevat de ketel zuiver water, dan wordt dus de conductor positief, de ketel negatief electrisch.

Met een toestel van Armstrong kan men eene zeer sterke werking verkrijgen. Bij dien, welke bij het Polytechnisch Instituut te Londen aanwezig is, en waarvan de ketel 2 ellen lang is, terwijl de stoom uit 46 openingen stroomt, verkrijgt men onophoudelijk vonken van 6 palm lengte; hij geeft ongeveer 45 maal meer electriciteit dan de bovenvermelde schijf-electriseermachine aan dezelfde inrigting. Het gebruik van deze soort van werktuigen als bron van electriciteit is echter ook aan talrijke bezwaren onderhevig; vooreerst moet er een geruime tijd verloopen, alvorens het water in den ketel genoegzaam verwarmd is, en in de tweede plaats wordt de atmospheer in het vertrek, waar men de proeven doet, door den ontwijkenden stoom zoo vochtig, dat het uiterst moeijelijk wordt daarin met goeden uitslag meer gevoelige electrische proeven te doen. De ketel zelf blijft echter door de warmte goed droog.

260. **Proeven met electriseer-machines.** — Wij hebben bij de beschrijving der electrische verschijnselen reeds melding gemaakt van onderscheidene proeven, zooals die, welke op het electrisch licht en de vonk betrekking hebben, de achtervolgende inductie van verscheidene geleiders, en meer andere, welke het wenschelijk is met eene goed werkende electriseer-machine te herhalen, opdat men zich van hare krachtige werking en de dikwijls indrukmakende vertooning kan overtuigen. Wij zouden bij deze proeven er nog zeer vele kunnen voegen, daar men bij geen gedeelte der natuurkunde zich meer heeft toegelegd om proeven te bedenken, voor vertooning geschikt. Daar echter de meeste daarvan voor de kennis der verschijnselen zelven van weinig of geen belang zijn, bepalen wij ons hier tot de vermelding van eenige weinige, waarvoor eene nadere toelichting of teregtwijzing wenschelijk is.

Wij hebben reeds hiervoor (243) melding gemaakt van het isoleerbankje. Plaatst zich iemand daarop, die zich door middel van een metalen kettingje in verbinding stelt met den conductor der electriseer-machine, dan wordt hij zelf geheel electrisch. Houdt een ander een geleider of de hand bij zijn ligchaam, dan springen er vonken over; zijne haren rijzen overeind door de electrische afstooting. Geschiedt deze proef in het donker en houdt de persoon, die zich op het bankje bevindt, eene metalen punt in zijne hand, dan ziet men daaruit het licht als 't ware uitstroomen.

Fig. 234.



Eene andere toepassing is het zoogenaamde electrisch klokkespel. Aan een metalen staaf AB (Fig. 234), die met den conductor verbonden is, zijn drie klokjes bevestigd, tusschen welke zich aan zijden draden opgehangen metalen balletjes bevinden. De twee buitenste klokjes C en D zijn door middel van metalen kettingjes opgehangen, zoodat zij dezelfde electriciteit als de conductor aannemen. Het middelste klokje E hangt aan eenen zijden draad, doch is door een daaraan hangend kettingje met den grond in verbinding. Wordt nu de electriseer-machine in beweging gebragt, dan worden de balletjes door de beide klokjes C en D

aangetrokken, doch daar zij zelven electrisch worden, terstond weder afgestooten. Het klokje E, dat door inductie electrisch geworden is, doch daardoor juist de tegenovergestelde electriciteit verkregen heeft, trekt nu de balletjes aan, welke daaraan terstond hunne electriciteit afgeven. Deze beweging duurt voort, zoolang als de conductor electrisch is.

Fig. 235.



Eene dergelijke proef kan men nemen met den in fig. 235 afgebeelden toestel, die bestaat uit eene flesch met metalen bodem, waarin zich op eenigen afstand daarboven een geleider A bevindt, welke met den conductor der machine verbonden is. In de flesch bevinden zich vlierpitballetjes, die door den geleider A worden aangetrokken, zoodra deze electrisch wordt. Daar de bodem, die met den grond in verbinding staat, door inductie de tegenovergestelde electriciteit verkrijgt, worden de balletjes beurtelings door beide aangetrokken, zoodat zij onophoudelijk op en neêr gaan, zoolang de electriseer-machine in beweging is.

Plaatst men op eenen niet-geleider verscheidene geleiders digt naast elkander, doch zonder dat zij onderling in aanraking zijn, dan zullen, zoo de eerste met den conductor en de laatste met den grond in verband wordt gebragt, tusschen elke twee achtervolgende geleiders vonken overspringen. Men heeft daarvan gebruik gemaakt bij de soort van toestellen, waarvan er een in fig. 236 is afgebeeld. Op eene glazen buis

Fig. 236.

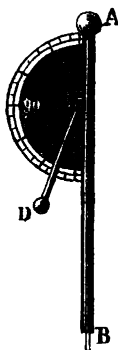


AB zijn eene menigte kleine stukjes bladtin geplakt, waarvan het eerste is verbonden met den koperen haak C, welken men aan den conductor der machine houdt, terwijl het andere uiteinde in de hand wordt genomen. Draait men nu aan de machine, dan springen er onophoudelijk overal, waar twee

stukjes bladtin zich in elkanders nabijheid bevinden, vonkjes over, zoodat men, wanneer deze proef in het duister geschiedt, eene onophoudelijk flikkerende figuur ziet, waaraan men elke gedaante geven kan, die men wil, mits men slechts de stukjes bladtin op eene doelmatige wijze naast elkander plaatst.

Wij hebben reeds de opmerking gemaakt, dat men van de warmte, welke de electrische vonk vergezelt, kan gebruik maken om een ligt brandbaar ligchaam te doen ontbranden. Daartoe is echter eene sterke vonk en dus eene krachtige electriseer-machine noodig Het best gelukt de proef, wanneer men zwavelether schenkt in een glazen bakje, in welks bodem zich een metalen geleider bevindt, die met den grond in verbinding is en tot even onder de oppervlakte der vloeistof reikt. Brengt men dan den geëlectriseerden conductor in de nabijheid, dan springt de vonk op den metalen geleider in het bakje over en doet de zwavelether ontbranden, door welken zij gaat.

Fig. 237.

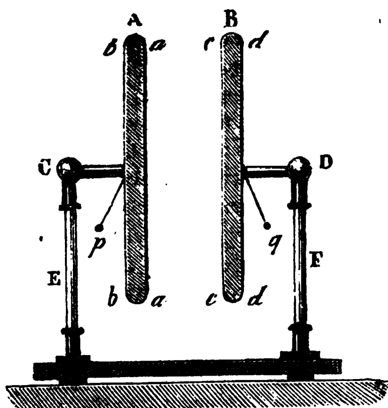


Om te kunnen oordeelen over den graad der lading van den conductor eener electriseer-machine, bevestigt men daarop den in fig. 237 afgebeelden toestel, bekend onder den naam van *electrometer van Henley.* Deze bestaat uit een metalen staaf AB, waaraan een stroohalm met een vlierpitballetje is bevestigd, die om het punt C draaijen kan. In den niet-electrischen toestand rust het balletje D tegen de metalen staaf; wordt deze electrisch, dan deelt zij hare electriciteit aan D mede, dat afgestooten wordt, en des te meer naarmate de spanning der electriciteit aanzienlijker is. Op den halven cirkel is eene graadverdeeling aangebragt, waaraan men den hoek kan aflezen, dien CD met AB maakt. Wordt die hoek niet grooter, in weerwil van het aanhoudend draaijen aan de machine, dan blijkt daaruit, dat de spanning niet toeneemt, en dat dus het verlies aan electriciteit tengevolge dier spanning even groot is, als de winst door de voortdurende ontwikkeling.

Heeft men zich in een vertrek eenigen tijd met proeven met eene electriseer-machine beziggehouden, dan neemt men een eigenaardigen reuk waar, welken sommigen bij dien van knoflook, anderen bij dien van brandenden zwavel of phosphorus vergelijken. Vooral is zulks het geval, als men electriciteit door punten heeft laten uitstroomen. De oorzaak daarvan moet gezocht worden in den alsdan gevormden ozon, waarvan wij hiervoor (27) reeds gewag hebben gemaakt, en die waarschijnlijk slechts een bijzondere toestand van de zuurstof is, waarin deze door den invloed der electriciteit overgaat.

261. **Condensator.** — Passen wij de eigenschappen van de opwekking der electriciteit door inductie of verdeeling (250) toe op den in fig. 238 afgebeelden toestel, bestaande uit twee even groote metalen schijven A en B, door middel van de geleiders C en D op twee glazen voeten E en F bevestigd, en zoodanig ingerigt, dat zij digter bij elkander geschoven of van elkander verwijderd kunnen worden, in diervoege echter, dat de naar elkander toegekeerde oppervlakten der platen A en B steeds evenwijdig blijven. Achter deze platen bevinden zich twee aan draden opgehangen vlierpitballetjes *p* en *q*.

Fig. 238.



Stellen wij, dat een van deze schijven, bijv. A, door middel van een aan den geleider C bevestigden ketting met eene electriseer-machine verbonden is, waardoor zij met zooveel mogelijk positieve electriciteit geladen wordt. Na de gemeenschap tusschen A en de machine te hebben doen ophouden, brengt men de schijf B tot digt bij A; de in A aanwezige electriciteit zal door inductie werken op B, zoodat daarin de negatieve electriciteit zich ophoopt aan de oppervlakte *cc*, terwijl de positieve zich begeeft naar *dd* en D. Het vlierpitballetje *q* zal zich dientengevolge van de oppervlakte *dd* verwijderen. Omgekeerd zal de negatieve electriciteit in *cc* terugwerken op A, waarin de positieve zich zal ophoopen aan de oppervlakte *aa*; dit wordt daardoor bevestigd, dat men het balletje *p* een weinig ziet nederdalen, wanneer B digter bij A wordt gebragt. Brengt men nu D in gemeenschap met den grond, dan zal de aldaar aanwezige positieve electriciteit zich verwijderen, terwijl er eene nieuwe ontleding van de nog aanwezige neutrale vloeistof plaats heeft, waardoor de hoeveelheid negatieve electriciteit aan de oppervlakte *cc* nog toeneemt, en, zoo als wij hiervoor bij de behandeling der inductie reeds hebben aangetoond, haar maximum zal bereiken, terwijl er in 't geheel geen positieve meer in B en D zal aanwezig zijn. Het aan den achterkant *dd* geplaatste balletje *q* zal dus niet meer worden afgestooten. De vermeerdering van negatieve electriciteit in *cc* zal echter niet zonder uitwerking blijven op A; daarin zal zich de positieve electriciteit nog meer op de oppervlakte *aa* ophoopen, zoodat de geleider C zich

nagenoeg in den neutralen toestand bevindt, en het balletje *p* niet meer door *bb* wordt afgestooten. Wordt nu C op nieuw met de electriseer-machine verbonden, dan kan deze geleider eene nieuwe hoeveelheid positieve electriciteit opnemen, welke dan, even als de oorspronkelijk daarop aanwezige, door eene gelijke behandeling van de schijf B kan gedwongen worden zich naar *aa* te begeven.

Door dit meermalen te herhalen kan zich eene zeer groote hoeveelheid electriciteit in A, en wel bepaaldelijk aan de oppervlakte *aa*, ophoopen. In plaats van den toestel beurtelings met de electriseermachine en den grond te verbinden, kan men echter ook C in verbinding laten met de electriseer-machine en D met den grond; de werking zal dan doorgaande zijn en zoo lang duren, tot zich in C zoo veel positieve electriciteit zal hebben opgehoopt, dat hare spanning even groot is als die in de machine zelve. Het spreekt echter van zelf, dat de spanning aan de oppervlakte *aa* dan veel aanzienlijker is, terwijl ook in *bb* zich eene groote hoeveelheid negatieve electriciteit zal hebben opgehoopt.

Uit het voorgaande blijkt, dat men door deze handelwijze in een geleider eene veel aanzienlijker hoeveelheid electriciteit kan ophoopen, dan door hem eenvoudig met de electriseer-machine te verbinden. De oorzaak daarvan moet alleen gezocht worden in de aanwezigheid van de schijf B. Wegens de grootere digtheid of densiteit, die men daardoor aan de electriciteit geeft, heeft men aan dezen toestel den naam van *condensator* (verdigter) gegeven.

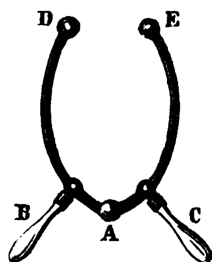
Wat de hoeveelheid der aldus opgehoopte electriciteit aangaat, zoo moet worden in aanmerking genomen, dat deze des te aanzienlijker zijn zal, naarmate de beide schijven A en B digter bij elkander zijn geplaatst, maar dat zij toch ook niet tot in het oneindige kan toenemen en eene grens heeft, die zij niet kan overschrijden. Het eerste is een gevolg van de vroeger (246) vermelde wet, dat de aantrekking van ongelijknamige electriciteiten grooter is, als de afstand kleiner wordt. Is die afstand echter zeer gering en de spanning aanzienlijk, dan zullen de beide elkander aantrekkende electriciteiten zich plotseling vereenigen. De afstand der schijven is tevens oorzaak, dat de hoeveelheid der electriciteit, die op de schijf B door die in A gebonden wordt, geringer is dan die in A, en dat de achtervolgens op elke der twee schijven door de andere gebonden hoeveelheden steeds kleiner worden, zoodat de geheele hoeveelheid eene zekere grens niet zal kunnen te boven gaan; deze grens zal bereikt zijn, zooals reeds is opgemerkt, wanneer de spanning in C even groot is, als die bij de electriseer-machine zelve.

Is de condensator op de zoo even beschrevene wijze geladen, dan zal men hem weder langzamerhand kunnen ontladen, door de beide schijven beurtelings

met den grond in verbinding te stellen. Uit het voorgaande toch blijkt het dat, wanneer men de verbinding van A en C met de electriseer-machine heeft doen ophouden, in dien geleider eene grootere hoeveelheid positieve electriciteit aanwezig moet zijn, dan door de negatieve in B kan gebonden worden. Raakt men dus A met den vinger aan, dan zal men aan die schijf eene zekere hoeveelheid electriciteit ontnemen, merkbaar aan het overspringen van eene kleine vonk. De in A overblijvende hoeveelheid is die, welke door de negatieve electriciteit in B gebonden wordt; zij is dus geringer dan de in B aanwezige. Men zal dus nu aan deze weder het meerdere kunnen ontnemen, terwijl er alleen die in overblijft, welke door de positieve in A wordt gebonden. Door beurtelings de beide schijven met den grond in verbinding te brengen, kan men dus eene langzame ontlading doen plaats hebben; de beide balletjes *p* en *q* zullen daarbij beurtelings worden afgestooten.

Raakt men de beide schijven niet beurtelings maar te gelijkertijd aan, dan heeft er eene plotselinge ontlading plaats, welke met een hevigen schok gepaard gaat, wanneer de spanning aanzienlijk is. Ten einde dien schok te vermijden, maakt men gebruik van den in fig. 239 afgebeelden toestel, die *algemeene ontlader* genoemd wordt, en bestaat uit twee metalen staven, van metalen knoppen D en E voorzien, en bij A door een scharnier aan elkander verbonden; B en C zijn twee glazen handvatsels. Men brengt den knop D in verband met de eene schijf, en doet E tot de andere naderen. Het overspringen van eene vonk, die doorgaans met een knetterend geluid gepaard gaat, doet zien dat de vereeniging der beide tegenovergestelde electriciteiten door middel van den geleider DAE plaats heeft. Somtijds maakt men ook gebruik van eenen ontlader, die niet van glazen handvatsels voorzien is; wanneer de spanning niet bijzonder groot is, zal men ook dan geen schok gevoelen, daar de vereeniging plaats heeft door het metaal, dat een beter geleider is dan het menschelijk ligchaam.

Fig. 239.

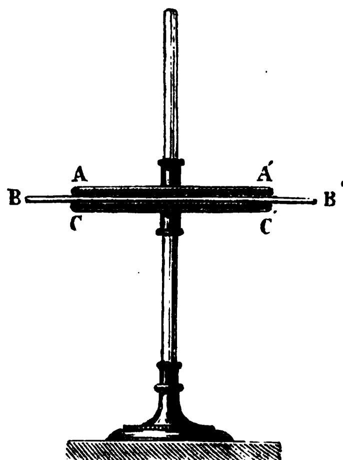


Wij hebben tot dus verre ondersteld, dat de beide schijven alleen door eene laag lucht van elkander gescheiden waren. Zoodanige laag isoleert wel de schijven van elkander, maar brengt men ze digt bijeen, dan heeft toch de vereeniging der electriciteiten plaats; men kan dus op die wijze nimmer eene sterke spanning verkrijgen. Men plaatst daarom bij voorkeur tusschen de schijven een ander isolerend ligchaam, bijv. eene glazen plaat of eene laag hars. De eenvoudigste toestel van dien aard is de zoogenaamde Franklin'sche plaat,

bestaande uit eene glazen plaat, aan beide zijden met bladtin belegd; om hem gemakkelijker vast te kunnen houden en het breken te voorkomen, omringt men het glas met eene houten lijst; het metaalbelegsel moet overal op een afstand van minstens eene halve palm van die lijst blijven. Aan een der beide kanten wordt een smal reepje bladtin geplakt, van het metaalbelegsel af tot aan die lijst, zoodat men, door den vinger daartegen te houden, dien geheelen kant met den grond in verbinding brengt. Wordt nu het metaalbelegsel aan den anderen kant der glazen plaat met de electriseer-machine verbonden, dan heeft men hetzelfde geval, als bij den zoo even beschreven condensator, alleen met dat onderscheid, dat zich tusschen de beide door inductie op elkander werkende metalen platen glas bevindt; de spanning kan dientengevolge veel aanzienlijker worden. Raakt men, terwijl men den vinger tegen het metalen reepje blijft houden, met de andere hand het metaalbelegsel aan den anderen kant der glazen plaat aan, dan gevoelt men een hevigen schok; bewerkstelligt men, hetgeen voorzigtiger is, de ontlading door middel van een metalen ontlader, dan heeft deze met eene sterke vonk plaats.

Hoewel dus de glazen plaat op deze verschijnselen geen invloed schijnt uit te oefenen, zoo blijkt toch die invloed duidelijk, wanneer men zich bedient van een toestel, zooals in fig. 240 is afgebeeld, waarin de beide door eene glazen plaat BB′ gescheiden metalen schijven AA′ en CC′ door middel van isolerende handvatsels kunnen worden weggenomen. Heeft men dezen condensator geladen, door AA′ met de electriseer-machine en BB′ met den grond in verbinding te brengen, en heeft men daarna die gemeenschap doen ophouden, dan zal men bevinden, wanneer men de bovenste plaat wegneemt, dat zich daarin slechts eene zeer geringe hoeveelheid electriciteit bevindt, hoewel het voorgaande zoude doen vermoeden, dat die hoeveelheid zeer aanzienlijk moet zijn. Neemt men ook de glazen plaat BB′ voorzigtig weg, en onderzoekt men CC′, dan zal men ook daaraan hetzelfde als aan AA′ waarnemen. Plaatst men ze daarna weder in dezelfde orde op elkander, dan zal er, als men AA′

Fig. 240.

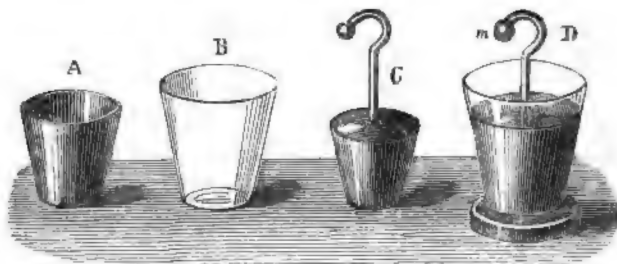


en CC' met elkander verbindt, eene even sterke ontlading plaats hebben, als wanneer zij niet gescheiden waren geweest.

Dit verschijnsel moet blijkbaar worden toegeschreven aan den invloed van het glas; onderzoekt men dit, door de vlakke handen op de twee tegenovergestelde oppervlakten te houden, dan ondervindt men een sterken schok, waaruit blijkt, dat de beide electriciteiten de schijven AA' en BB' verlaten en zich op het glas begeven hadden; of eigenlijk, dat door den invloed van die schijven de tegenovergestelde electriciteiten zich aan de beide oppervlakten van het glas hadden opgehoopt, waarin zij zich niet konden vereenigen, omdat glas een slechte geleider is. Raakt men de beide kanten van de glazen plaat slechts met de toppen van twee vingers aan, dan hebben er slechts zeer geringe en van zwakke vonkjes vergezelde ontladingen plaats; ook het zwakke dier ontladingen moet aan de slechte geleiding worden toegeschreven

Men kan zich nog op eene zeer eenvoudige wijze van deze werking overtuigen, door den in fig. 241 afgebeelden toestel, bestaande uit een blik-

Fig. 241.



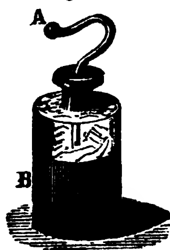
ken beker A, waarin een glas B naauwkeurig past, terwijl in dit glas een juist passend, gemakshalve met een haak voorzien, hol blikken ligchaam C geplaatst wordt. Men zal inzien, dat de vorm van het glas niets ter zake doet, en dat dus, wanneer deze drie voorwerpen in elkander geplaatst zijn, zooals in D, de werking geheel dezelfde moet zijn als bij den toestel, in fig. 240 afgebeeld. Houdt men D vast bij den buitensten beker, en brengt men den knop *m* in verbinding met de electriseermachine, dan wordt de toestel geladen. Plaatst men hem dan op een isolerenden voet, en neemt men hem uit elkander door middel van een glazen haak, dan zal men bevinden, dat A en C slechts weinig electrisch zijn, terwijl het glas B dezelfde verschijnselen vertoont, als zoo

even de glazen plaat. Na den toestel weder in elkander gezet te hebben, kan men hem ontladen.

Bij deze glas-condensators is echter nog een bijzonder verschijnsel op te merken. Heeft namelijk de ontlading plaats gehad, en laat men den toestel dan eenige oogenblikken staan, dan zal men bevinden, dat er, als men de twee metaalbelegsels door middel van den ontlader met elkander in verbinding brengt, weder eene vonk overspringt. Er heeft dus op nieuw eene ontlading plaats. Dit moet daaraan worden toegeschreven, dat, wegens de geringe geleidbaarheid van het glas, de electriciteit, die zich, zoo als opgemerkt is, aan zijne beide oppervlakten had opgehoopt, en zelfs door hare spanning eenigzins daar binnen was doorgedrongen, het niet aanstonds geheel heeft kunnen verlaten bij de eerste ontlading. Die, welke daarin was overgebleven, zal zich dus eerst na eenige oogenblikken bij eene nieuwe ontlading vertoonen.

262. **Leidsche flesch, batterij.** — De vorm, waaronder de condensator het meest voorkomt, is die van de zoogenaamde *Leidsche flesch*, aldus genaamd naar den Leidschen hoogleeraar Musschenbroek, die ze in 1746 met zijn leerling Cunaeus bij toeval uitvond. In de eene hand had hij een glas met water, waarin hij een metalen staafje had geplaatst, dat hij, ten einde het water te electriseren, met eene electriseer-machine in verbinding bragt. Dit geschied zijnde wilde hij, het glas steeds in de eene hand houdende, met de andere het staafje er uit nemen, doch gevoelde, toen hij het aanraakte, een hevigen schok. Men zal ligt inzien, dat het water in dit geval het inwendige bekleedsel, de hand het uitwendige bekleedsel van het glas uitmaakte, dat de toestel op dat oogenblik dus niets anders dan een condensator was, en dat er dientengevolge eene ontlading moest plaats hebben, toen, door de andere hand bij het in het water staande staafje te brengen, die beide met tegenovergestelde electriciteit geladen bekleedsels met elkander in verbinding werden gebragt. Deze proef gaf de eerste aanleiding tot de zamenstelling der Leidsche flesch, die daarna verschillende verbeteringen onderging. Tegenwoordig heeft deze doorgaans den in fig. 242 afgebeelden vorm; zij bestaat uit eene flesch, waarin zich zeer dun koperblad bevindt, en die gesloten is door eene kurk, waardoor een dik koperdraad is gestoken, dat binnen in de flesch in aanraking is met het koperblad, en aan het andere uiteinde van een knop A voorzien is. Aan den buitenkant is de flesch tot op eene zekere hoogte B met bladtin bekleed, terwijl het niet bekleede

Fig. 242.

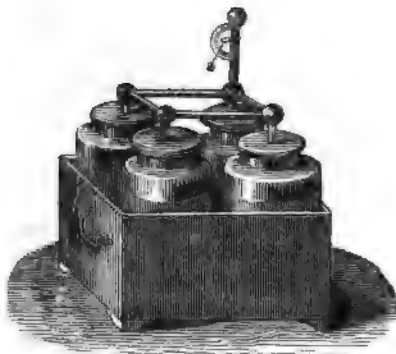


gedeelte met schellak-vernis bestreken is. Het is duidelijk, dat het koperblad hier de plaats van het inwendig bekleedsel inneemt. Heeft de flesch een zeer wijden mond, dan beplakt men ze ook wel van binnen met bladtin in plaats van er koperblad in te doen, en bevestigt dan aan het koperdraad een koperen kettingje, dat tot aan het bladtin op den bodem reikt. Om zoodanige flesch te laden is het voldoende om den knop A in verbinding met eene electriseer-machine te brengen, terwijl men de flesch bij de buitenste bekleeding vasthoudt, of deze door een geleider met den grond in verbinding brengt. Men kan de flesch ook laden, door het koperdraad A in de hand te houden, en het bekleedsel van bladtin met de electriseer-machine in gemeenschap te brengen. In dit geval zal, wanneer de machine positieve electriciteit geeft, de buitenste bekleeding positief electrisch zijn, terwijl zij in het eerste geval negatief electrisch was.

De ontlading heeft plaats, door het eene been van den ontlader tegen de oppervlakte van het bladtin te houden, en dan het andere been bij den knop A te brengen.

Daar de hoeveelheid electriciteit, die zich bij een condensator kan ophoopen, evenredig is aan de oppervlakte van de bekleedsels, zoo zullen groote fleschen eene veel sterkere werking geven dan kleinere. Om de werking nog te vermeerderen, vereenigt men verscheidene fleschen met elkander tot eene *batterij*, door ze naast elkander in een bak te plaatsen, zooals in fig. 243 is voorgesteld; de bodem van den bak is bekleed met bladtin, zoodat alle buitenste bekleedsels der fleschen met elkander verbonden zijn, de binnenste worden eveneens onderling in verbinding gebragt door koperen staven, die de knoppen vereenigen. De lading geschiedt volkomen op dezelfde wijze, als bij eene enkele flesch; door middel van eenen electrometer van Henley kan men nagaan, wanneer de spanning haar maximum heeft bereikt. Men drage zorg, dat de buitenste bekleedsels door een goeden geleider met den grond verbonden zijn. Op deze wijze kan men zooveel Leidsche fleschen tot eene batterij verbinden, als men slechts verkiest, en

Fig. 243.



door verschillende batterijen met elkander in verband te brengen de werking nog meer versterken.

263. **Verschijnselen, door de electrische ontlading te weeg gebragt.** — Wij hebben zoo even reeds melding gemaakt van den schok, dien men gevoelt, wanneer de electrische ontlading door het ligchaam plaats heeft. Is de schok ligt, dan gevoelt men hem alleen in de armen; ontstaat hij door de ontlading van eene groote flesch, dan gevoelt men hem tot in de borst. Wanneer verscheiden personen elkander de hand geven, en de eerste eene geladen flesch aan het buitenste bekleedsel vasthoudt, terwijl de laatste die aan den knop aanraakt, dan gevoelen allen den schok op hetzelfde oogenblik. Die in het midden geplaatst zijn, gevoelen hem minder hevig, daar tengevolge van de gemeenschap met den grond een gedeelte der electriciteit daarin verloren gaat. Heeft men eene batterij in plaats van eene flesch, dan kan de schok gevaarlijk worden; de ondervinding heeft geleerd, dat door de ontlading van sterke batterijen zelfs dieren kunnen gedood worden.

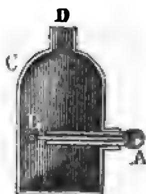
De vonk, die bij de ontlading wordt waargenomen, is minder lang dan die, welke ontstaat; wanneer men eenen geëlectriseerden conductor met de hand aanraakt, maar zij is helderder. Bij de ontlading ontwikkelt zich, even als bij de gewone vonk, de eigenaardige reuk van ozon; het is waarschijnlijk, dat ook hier de in de lucht aanwezige zuurstof door den invloed der electriciteit in ozon veranderd wordt. De kleur van de vonk is wit in de dampkringslucht. In verdunde lucht wordt de vonk grooter, dat is, de ontlading heeft reeds op grooteren afstand plaats, en hare kleur wordt roodachtig. In het luchtledige ziet men geene vonk, maar een frasi zacht violet licht. De aard der stoffen, tusschen welke de vonk overspringt, oefent ook eenen merkbaren invloed op hare kleur uit. Tusschen twee verzilverde geelkoperen bollen is zij groenachtig, tusschen twee stukken kool rood. De oorzaak van deze kleur schijnt alleen daaraan te moeten worden toegeschreven, dat kleine deeltjes van de stof worden medegeslingerd.

De ontladingsvonk kan, even als de gewone vonk, de warmteverschijnselen voortbrengen, waarvan wij hiervoor (260) melding hebben gemaakt. Is de spanning aanzienlijk, dan is de werking veel heviger. Zoo kan men bijv. een dunnen metaaldraad daardoor doen gloeijen of smelten. Plaatst men een dunnen gouddraad tusschen twee kaarten, die men sterk zamenperst tusschen een paar van klemschroeven voorziene blokjes, en laat men de ontlading daardoor plaats hebben, dan vindt men niets van den gouddraad terug dan eenige purperkleurige vlekken op de kaarten, welke ver-

oorzaakt zijn door het metaal, dat door de ontlading gesmolten en weggeslingerd is.

Riess heeft proeven in het werk gesteld om den graad der verwarming, die metaaldraden door de electrische ontlading ondervinden, te bepalen. Hij heeft bevonden, dat die verwarming evenredig is met de tweede magt van de in de batterij opgehoopte hoeveelheid electriciteit, wanneer men namelijk van dezelfde batterij gebruik maakt, alsmede evenredig met de vierde magten van de middellijnen der draden zelven. Draden van verschillende metalen geven echter verschillende uitkomsten, hetgeen moet worden toegeschreven aan de meerdere of mindere geleidbaarheid, of beter gezegd, aan den geringeren of grooteren wederstand, welken die metalen aan de electriciteit bieden. Die weerstand is omgekeerd evenredig aan de lengte van de draden, vereischt om ze evenveel te verwarmen. Terwijl een koperdraad van 100 duim van eene bepaalde dikte door de ontlading eener batterij eene zekere temperatuurverhooging ondergaat, zullen een zilverdraad van 148,7 duim, een gouddraad van 88,9 duim, een geelkoperdraad van 27,7 duim, een platinadraad van 15,5 duim en een nieuw-zilverdraad van 8,9 duim, alle van dezelfde dikte, door de ontlading dier zelfde batterij eene even groote verhooging van temperatuur ondervinden.

Fig. 244.



Eené eenvoudige proef van de verwarming door de electrische vonk biedt het in fig. 244 afgebeelde pistool van Volta aan. Dit bestaat uit eene blikken bus C, bij D door eene kurk gesloten; in den wand bevindt zich eene opening, waardoor een met knoppen A en B voorzien koperen staafje gestoken is, dat met lak bevestigd of met een glazen buisje omringd is, zoodat het van den wand geïsoleerd is. Vult men nu de bus met knalgas (27), en brengt men A in verbinding met den knop eener geladene flesch, dan zal, zoodra men door middel van den ontlader de buitenste bekleeding dier flesch en den wand der bus C met elkander in verbinding brengt, bij B eene vonk overspringen, waardoor het gas ontstoken wordt, zoodat de kurk bij D met een harden slag wegvliegt. De proef gelukt doorgaans even goed met eene gewone electrische vonk, zonder dat men juist van de ontladingsvonk behoeft gebruik te maken.

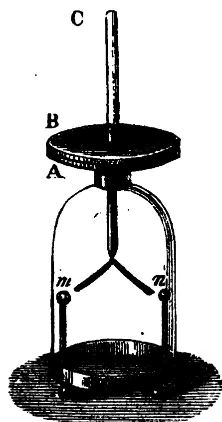
Gaat de ontladingsvonk door een voorwerp heen, dan geschiedt zulks niet, zonder dat het verbroken of doorboord wordt. Men kan eene kaart, ja zelfs eene dunne glazen plaat doorboren, door ze tusschen twee juist tegenoverstaande metalen punten te plaatsen, waarvan de eene met het buitenste, de andere met het binnenste bekleedsel eener batterij verbonden wordt. Bij glas gelukt de proef het best, wanneer men het op de plaats, waar men het doorboren wil,

met een druppel terpentijnolie bevochtigt. Met de kaart gaat het gemakkelijker; beschouwt men ze, nadat zij doorboord is, dan bevindt men, dat de vezeltjes van het papier aan beide kanten naar buiten gekeerd zijn, juist alsof de beweging van binnen uit de kaart naar hare beide oppervlakten had plaats gehad.

Eindelijk moeten wij nog gewag maken van de scheikundige werking van de ontladingsvonk. In de eerste plaats moet daartoe gebragt worden de reeds vermelde verandering van de gewone zuurstof in ozon. De electrische vonk heeft voorts de eigenschap van sommige zamengestelde gassen te ontleden; ammoniakgas wordt ontleed in stikstofgas en waterstofgas, koolzuur in zuurstofgas en kooloxydgas. Ook enkele vaste stoffen, zooals sommige oxyden, zuren en zouten, worden in hare bestanddeelen gescheiden. Er zijn echter verscheidene achtereenvolgende ontladingen noodig om deze verschijnselen duidelijk zigtbaar te maken.

264. **Electrometer van Volta.** — Volta heeft van de eigenschappen van den condensator gebruik gemaakt om aan den hiervoor (254) beschreven electroskoop of electrometer eene grootere gevoeligheid te geven. De door hem uitgedachte en in fig. 245 afgebeelde toestel is slechts eene vereeniging van den gewonen goudblad-electroskoop met den condensator. De knop A van fig. 230 is in fig. 245 vervangen door eene platte metalen schijf A, waarop eene dunne laag vernis is uitgespreid; daarop laat men eene tweede eveneens verniste plaat B rusten, welke met een isolerend handvatsel C voorzien is. De werking van dezen toestel is zeer eenvoudig. Men laat de beide platen A en B op elkander rusten, en brengt eene van beiden, bij voorbeeld A, in verbinding met een ligchaam, dat men onderstelt zwak electrisch te zijn; tevens raakt men de andere plaat B met den vinger aan. De isolerende laag vernis tusschen de beide platen is oorzaak, dat deze even als de platen van den hiervoor beschrevenen condensator op elkander werken. De electriciteit, die zich tengevolge van de aanraking met het electrisch ligchaam in A bevindt, bindt eene zekere hoeveelheid tegenovergestelde electriciteit in B, welke wederom op die in A terugwerkt, zoodat alle electriciteit uit het ligchaam, dat men onderzoeken wil, overgaat naar de bovenste oppervlakte der plaat A. Dientengevolge bespeurt men aan de goud-

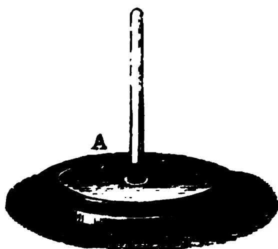
Fig. 245.



blaadjes *m* en *n* ook geene afwijking. Verwijdert men nu den vinger van B, en het electrische ligchaam van A, en ligt men dan B op, dan zal de electriciteit, die zich in A bevindt, zich over den geheelen electrometer verdeelen en de beide goudblaadjes van elkander doen afwijken. Bij het gebruik van dit werktuig, dat dient om zeer geringe hoeveelheden electriciteit op te sporen, welke men op eene andere wijze niet kan ontdekken, moet men vooral zorgen, dat er zoo min mogelijk electriciteit verloren gaat, en het te dien einde vooraf goed droogen en verwarmen.

265. **Electrophoor.** — Eene andere uitvinding van Volta is de zoogenaamde *electrophoor*, in fig. 246 afgebeeld, en geschikt om in vele gevallen de electriseer-machine te vervangen. Hij bestaat eenvoudig uit eene harskoek A, gegoten in eenen metalen schotel B, alsmede uit eene metalen plaat C, die iets kleiner is dan de harskoek en van een isolerend handvatsel voorzien is. De harskoek wordt, na goed gedroogd en eenigzins verwarmd te zijn, met een kattevel geslagen of gewreven, en verkrijgt daardoor negatieve electriciteit. Plaatst men daarop de melen plaat C (men kan ook eene houten schijf, met bladtin bekleed, daarvoor nemen), dan wordt deze door inductie electrisch, zoodat de onderste oppervlakte, die met de hars in aanraking is, positief en de bovenste oppervlakte negatief electrisch wordt. Raakt men den bovenkant aan, dan bemerkt men eene kleine vonk, die daardoor ontstaat, dat de negatieve electriciteit op de hand overgaat. Ligt men hem dan op door middel van het isolerend handvatsel, dan bevindt men, dat hij nog sterk positief geladen is; dit is natuurlijk, want de positieve electriciteit, vroeger door den negatief electrischen harskoek naar de benedenste oppervlakte getrokken, verdeelt zich nu over het geheele metaal en gaat bij aanraking op een anderen geleider over. Herhaalt men deze eenvoudige bewerking, dan kan men achtervolgens eene menigte positieve vonken van de plaat C op een conductor doen overgaan. Hierbij valt nog op te merken, dat noch die positieve electriciteit, noch de negatieve, die men afleidt, wanneer het deksel nog met de harskoek in aanraking is, aan de hars ontnomen worden; deze werkt alleen verdeelend op de beide electriciteiten, die zich in den neutralen toestand in C bevinden. Men zoude nog kunnen meenen, dat de negatieve electriciteit in de hars zich moet

Fig. 246.



vereenigen met de positieve in het deksel; dit geschiedt echter niet, of althans slechts in geringe mate, omdat de hars, als niet-geleider, de electriciteit niet gemakkelijk loslaat, alsook omdat de zich op hare bovenste oppervlakte bevindende negatieve electriciteit gebonden wordt door de positieve, welke daardoor in den schotel wordt opgewekt. Het is ook om deze laatste reden, dat die schotel van metaal en met den grond in verbinding behoort te zijn, daar anders de daarin aanwezige electriciteit niet zou kunnen afgeleid worden. Op grond van het voorgaande zal men inzien, dat men, wanneer de electrophoor geïsoleerd was, slechts zeer zwakke vonken zoude kunnen verkrijgen.

De electrophoor doet blijkens het voorgaande dezelfde dienst als eene electriseer-machine; wel geeft hij geene zoo sterke vonken, maar toch kan men door de hiervoor aangewezene bewerking eenige malen te herhalen en de schijf C telkens met den knop eener Leidsche flesch in aanraking te brengen, deze laden.

266. **Opwekking van electriciteit door mechanische middelen en door warmte.** — Wij hebben tot dusverre alleen gesproken van de electriciteit, die door wrijving in de ligchamen wordt opgewekt; ook door andere mechanische middelen kunnen deze echter electrisch gemaakt worden, zoo als uit de volgende proeven blijken zal.

Wanneer men op eene met gewaste taf bekleede houten schijf eene metalen schijf drukt, daarbij zorg dragende haar niet te wrijven, en haar dan door middel van een isolerend handvatsel opligt, dan zal men bevinden, dat het metaal negatief electrisch geworden is. Het zelfde verschijnsel schijnt plaats te vinden overal, waar twee ligchamen tegen elkander gedrukt worden; zijn echter beide geleiders, dan vereenigen de tegenovergestelde electriciteiten zich weder met elkander, en men bemerkt ze niet; in het zoo even vermelde geval had die vereeniging niet plaats, daar het gewaste taf een slechte geleider is. Zeer duidelijk vertoont zich ook dit verschijnsel, wanneer men kurk en elastieke gom tegen elkander drukt; de eerste wordt dan positief, de andere negatief electrisch.

Kalkspath bezit deze eigenschap in hooge mate; drukt men een kristal van deze stof tusschen de vingers, dan wordt het positief electrisch en behoudt die electriciteit zeer langen tijd,

Bij de meeste ligchamen wordt ook door breken, splijten of klieven electriciteit opgewekt; men ziet dit duidelijk aan de vonk, die zich vertoont, wanneer men in het donker een stuk broodsuiker doorbreekt. Vooral bij kristallen, die gemakkelijk gekliefd worden, vertoont zich dit verschijnsel

duidelijk; wanneer men eene plaat mica plotseling klieft, dan wordt het eene stuk positief, het andere negatief electrisch; wordt een der aldus verkregene stukken andermaal op gelijke wijze behandeld, dan neemt men weder volkomen hetzelfde waar.

De oorzaak van de opwekking van electriciteit schijnt in al deze gevallen daarin gezocht te moeten worden, dat de evenwigtstoestand der moleculen verbroken wordt. Dit komt ook overeen met de waarneming van Becquerel, dat de electrische verschijnselen des te sterker zijn, naarmate de zamenhang der deeltjes grooter is.

Wij zullen later meer bepaaldelijk de electrische verschijnselen behandelen, die door warmte veroorzaakt worden; een enkel geval verdient echter nog hier vermeld te worden, daar de aard der opgewekte electriciteit geheel met dien van de tot dusverre besprokene overeenkomt. Wordt een tourmalijn-kristal verwarmd, dan wordt het electrisch en wel in diervoege, dat het eene uiteinde positief, het andere negatief wordt.

267. **Lucht-electriciteit.** — Plaatst men een electroskoop, met eene verscheidene ellen lange puntige metalen staaf voorzien, in de vrije lucht, dan bemerkt men aan de afwijking van de goudblaadjes, dat deze electrisch zijn geworden. Die electriciteit moet dus aan de lucht ontleed zijn, en men mag uit deze proef dus afleiden, dat de dampkring zelf electrisch is. Hoe hooger de staaf in de lucht reikt, des te sterker electriciteit wordt er waargenomen; onder boomen of daken bemerkt men ze niet, maar wel in het vrije veld, of op hooge gebouwen. Zij is op zeldzame uitzonderingen na, steeds positief.

De electriciteit, die men aan den electroskoop waarneemt, wordt dezen niet medegedeeld door de lucht, maar men mag aannemen, dat de metalen staaf door inductie electrisch wordt, zoodat het bovenste gedeelte negatief electrisch is, terwijl men aan de goudblaadjes positieve electriciteit waarneemt. Door den invloed van de positieve electriciteit in de lucht worden de in den grond in neutralen toestand aanwezige electriciteiten gescheiden; dientengevolge neemt men aan de oppervlakte der aarde negatieve electriciteit waar.

De electrische toestand van de lucht is echter niet altijd dezelfde; zij verschilt aanmerkelijk in verschillende jaargetijden en zelfs op verschillende uren van den dag. Uit te dien einde in het werk gestelde waarnemingen heeft men afgeleid, dat de lucht het sterkst electrisch is in de maanden November en December, het minst in Junij en Julij. De lucht-electriciteit groeit voorts aan na den opgang en na den ondergang van de zon, zoodat er in elke 24

uren twee maxima en twee minima worden waargenomen; de eersten hebben gemiddeld plaats des morgens en des avonds te 10 uren, de minima vallen ongeveer in des morgens en des namiddags te 1 ure.

De hier vermelde verschijnselen worden waargenomen bij een onbewolkten hemel; zijn er wolken in de lucht, dan is de electrische toestand van den dampkring aan meerdere onregelmatigheid onderhevig. Dikwijls verandert dan de aard der lucht-electriciteit, zoodat zij nu eens positief, dan eens negatief is. Dit moet alleen aan den invloed der wolken worden toegeschreven, die ook in verschillende electrische toestanden kunnen verkeeren. De positieve wolken ontstaan door de condensatie van in de lucht aanwezige waterdampen in hoogere luchtlagen; zij nemen dan bij de verdigting teveus de in de lucht aanwezige positieve electriciteit op. De negatieve toestand van sommige wolken laat zich niet zoo eenvoudig verklaren; men schijnt echter te mogen aannemen, dat bij hare vorming de inductie weder eene voorname rol speelt. Is namelijk eene wolk positief geladen, dan zal de electriciteit zich zooveel mogelijk naar hare oppervlakte begeven, even als zulks bij alle geleiders plaats heeft. Komt nu deze wolk in eene hoogere luchtlaag, waar de zich daarboven bevindende lucht sterker positief electrisch is, en waarboven zich dus ook sterker positieve wolken bevinden, dan zullen deze bij inductie op haar werken, en zal de positieve electriciteit van de wolk zich naar haar onderste gedeelte begeven, de door verdeeling ontstane negatieve naar het bovenste gedeelte. Verliest de wolk nu, door gedeeltelijk in regen over te gaan, de positieve electriciteit, dan blijft alleen de negatieve in het bovenste gedeelte over, die echter, wanneer de wolk in eene andere luchtlaag komt, zich weder meer regelmatig over hare geheele oppervlakte zal verspreiden. Somtijds kunnen ook wolken negatief electrisch zijn, wanneer zij zijn ontstaan uit den nevel, die uit den grond opstijgt, en dus de negatieve electriciteit van de aarde met zich medeneemt.

Den oorsprong der lucht-electriciteit heeft men tot dusverre nog niet met voldoende zekerheid weten aan te wijzen. Als eene der oorzaken kan men echter de verdamping aan de oppervlakte der aarde beschouwen. Uit proefnemingen van Pouillet is gebleken, dat bij verdamping doorgaans de ontwijkende damp electrisch is, terwijl het vat, waarin de verdamping plaats heeft, de tegenovergestelde electriciteit behoudt; alleen dan, wanneer het vocht zuiver water is, neemt men geene ontwikkeling van electriciteit waar. Houdt het water zouten in oplossing, dan is de damp positief. Daar nu alle wateren aan de oppervlakte der aarde zouten opgelost houden, zoo wordt daardoor althans eene der redenen van den positief electrischen toestand van den dampkring aangewezen.

268. **Onweder en bliksem.** — Reeds lang had men vermoed, dat de bliksem of het weêrlicht niets anders is dan eene groote electrische vonk. Met volkomene zekerheid werd dit echter eerst aangetoond omstreeks het midden der 18e eeuw door Franklin, die beweerde, dat men door middel van metalen punten aan de onweêrswolken hunne electriciteit moest kunnen ontnemen. Terwijl te dien einde in Frankrijk proeven in 't werk gesteld werden door Dalibard, met dat gelukkig gevolg, dat hij door middel van eene 33 ellen lange staaf electrische vonken aan den dampkring ontleende, sterk genoeg om eene Leidsche flesch te laden, zette Franklin zelf te Philadelphia zijne onderzoekingen voort met behulp van een vlieger, dien hij hoog in de lucht opliet, terwijl hij aan het ondereind van het touw een ijzeren sleutel vast maakte, dien hij door middel van een zijden draad isoleerde. Aanvankelijk bespeurde hij geene werking, hoewel er blijkbaar onweêrswolken aan de lucht waren; een oogenblik daarna begon het echter te regenen, zoodat het touw vochtig en daardoor een beter geleider werd; toen hij de hand bij den sleutel bragt, bemerkte hij aanstonds eene vonk. De electriciteit werd in dit geval eigenlijk niet medegedeeld aan den vlieger, maar het verschijnsel moet ook weêr onder de inductieverschijnselen gerekend worden. Door deze en dergelijke proeven kreeg men weldra de overtuiging, dat hetgeen men doorgaans eene onweêrswolk noemt, eigenlijk niets anders is dan eene sterk electrische wolk.

Bliksem of weêrlicht is dus niets anders dan een electrisch licht, dat van de eene wolk op de andere of op de aarde overgaat. Nogtans moet men verschillende soorten onderscheiden. In de eerste plaats moet het verschijnsel genoemd worden, dat doorgaans door den naam *bliksem* wordt aangeduid en bestaat uit een zigzagvormig licht, dat zich met buitengewone snelheid door de lucht beweegt; deze vorm schijnt te moeten worden toegeschreven aan den tegenstand, welken de sterk zamengedrukte lucht uitoefent, en waardoor de straal verpligt wordt herhaaldelijk van den regten weg af te wijken. Heeft dit digt bij de aarde plaats, dan is de kleur van het licht wit; geschiedt het hooger, in dunnere luchtlagen, dan is het paarsachtig van kleur. In de tweede plaats moet datgene vermeld worden, wat men doorgaans weêrlicht noemt, en waarbij men geene lichtgevende streep, maar meer een algemeen sterk licht waarneemt, dat niet zoo als de bliksem van de eene wolk op de andere overslaat, maar in de wolk zelve schijnt te ontstaan. Voorts moet tot deze verschijnselen ook het licht gebragt worden, dat men veelal na een warmen zomerdag des avonds bij onbewolkten hemel bijna onophoudelijk aan den horizon waarneemt, en dat in sommige streken van ons land onder den naam van *hitsen* (1) bekend

1) Welligt afkomstig van het hoogduitsche *Hitze;* in het Fransch spreekt men ook van *éclairs de chaleur.*

is. De oorsprong dezer electrische ontladingen moet waarschijnlijk gezocht worden in wolken, die zich beneden den horizon bevinden, en wel op zoodanigen afstand, dat men het geluid, dat ze vergezelt, niet hooren kan.

De duur van het licht in deze drie gevallen is zeer kort. Wheatstone, die daaromtrent proeven heeft genomen, beweert, dat de duur minder bedraagt dan een duizendste gedeelte van eene seconde. Dit is niet het geval met den vierden vorm, waarin zich de bliksem somtijds vertoont, namelijk dien van een vuurbol, die veel langzamer van den hemel tot de aarde daalt en daar aangekomen met eene sterke ontploffing uiteen schijnt te springen. Dezen laatsten vorm heeft men tot dusverre nog niet voldoende kunnen verklaren.

Het weêrlicht gaat gepaard met een geluid, dat onder den naam van *donder* bekend is, en dat veroorzaakt wordt door den hevigen schok, welken de lucht door de plotselinge uitzetting bij de electrische ontlading ondervindt. Dit geluid heeft plaats op hetzelfde oogenblik, als de ontlading; dat wij het eerst later vernemen, moet alleen daaraan worden toegeschreven, dat de snelheid van het licht zoo groot is, dat het van de plaats, waar zich de onweêrswolk bevindt, in een uiterst geringen tijd tot ons oog komt, terwijl het geluid, zoo als wij (123) gezien hebben, slechts 332 ellen in de seconde aflegt. Men kan daarom den afstand van de onweêrswolk gemakkelijk in ellen berekenen door na te gaan, hoeveel seconden er verloopen tusschen het licht en den slag, en het getal van deze met 332 te vermenigvuldigen.

Wat den aard van het geluid aangaat, zoo moet het rollend geluid gedeeltelijk daaraan worden toegeschreven, dat de slag, die het licht onmiddellijk volgt, herhaaldelijk tegen de wolken wordt teruggekaatst; gedeeltelijk ook welligt wordt de onregelmatigheid, welke bij den donder wordt waargenomen, veroorzaakt door den vorm van den bliksem zelven, daar er misschien eene versterking van geluid plaats heeft telkens als de rigting van den lichtstraal verandert.

Wanneer wolken sterk met electriciteit geladen zijn, dan oefenen zij een zeer merkbaren invloed op de aardoppervlakte uit. De tegenovergestelde electriciteit wordt dan sterk aangetrokken, en tracht zich door alle uitstekende punten van de aarde te verwijderen. Geschiedt zulks in den nacht, dan is het duidelijk aan het licht, dat daaraan schijnt uit te stroomen. Het is dit verschijnsel, dat vroeger onder den naam van St. Elms-vuur bekend was.

Is de lading zeer sterk, zooals in een onweêr, dan kan er vereeniging der beide electriciteiten en dus ontlading plaats hebben. In dit geval zegt men, dat de bliksem inslaat. Men moet aan deze uitdrukking echter niet die beteekenis hechten, dat de bliksem zich van de wolk naar het voorwerp, waarin

hij inslaat, begeeft; even als bij de kleine electrische vonken schijnt ook hier het licht te gelijk van de aarde en de wolk uit te gaan.

Doorgaans slaat de bliksem in de hoogste voorwerpen in, omdat deze zich het digst bij de elektrische wolk bevinden; nogtans kan men dit niet als een vaste regel aannemen, daar het menigmaal gebeurt, dat de bliksem in een lager voorwerp inslaat, vooral wanneer zich daaraan metalen of andere goed geleidende deelen bevinden. Is de bliksem eenmaal ingeslagen, dan volgt hij de metalen geleidingen. Daar het dierlijk ligchaam ook een zeer goede geleider is, gaat de bliksem ook ligt daarop over. Wanneer menschen of dieren getroffen worden, worden zij doorgaans onmiddellijk gedood. De werking van den bliksem gaat met aanzienlijke warmte gepaard. Metalen, zelfs platina, worden er door gesmolten en brandbare voorwerpen aangestoken; de door den bliksem ontstaande brand is meestal zoo hevig, dat een getroffen gebouw binnen weinige oogenblikken geheel in vlammen staat.

269. **Bliksem-afleiders.** — De wensch, om zoo mogelijk zoodanige ongelukken te voorkomen, gepaard met eene naauwkeuriger kennis van den aard der lucht-electriciteit, leidde Franklin tot de uitvinding van den bliksem-afleider. Deze bestaat uit eene puntige metalen staaf, die op het hoogste gedeelte van een gebouw geplaatst wordt, en door middel van andere staven in onafgebroken geleidende verbinding is met den grond. De werking van zoodanige staaf laat zich gemakkelijk verklaren. Is de lucht of de onweêrswolk sterk positief electrisch, dan zal de negatieve electriciteit van den grond zich naar het uiteinde van die staaf begeven, en volgens de reeds vermelde eigenschap van de metalen punten (252) daaruit stroomen; in dat geval heeft er eene gestadige vereeniging van de beide electriciteiten, doch geene plotselinge ontlading plaats. Het kan echter gebeuren, dat er bij eene sterke lading van de wolk toch eene ontlading plaats heeft; in dat geval zal echter de bliksem doorgaans in den afleider inslaan, vooreerst omdat hij het sterkst tegenovergesteld electrisch is, voorts omdat hij een zeer goede geleider is. Gaat de afleider onafgebroken door tot in den grond, of wat nog beter is, tot in een met water gevulden put, dan volgt de bliksem hem geheel, zonder dat het gebouw schade ondervindt.

Eene vergelijking van het aantal keeren, dat de bliksem is ingeslagen in torens en andere gebouwen, vóór en nadat men er afleiders op heeft geplaatst, pleit sterk voor het nut dezer uitvinding. Waar zich meer hooge gebouwen in elkanders nabijheid bevinden, moet men elk van een afleider voorzien, daar de afleidende werking zich niet ver uitstrekt; volgens sommigen niet verder

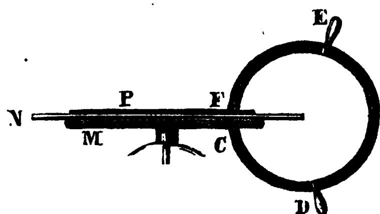
dan de dubbele hoogte van den afleider, volgens anderen niet verder dan 10 el in de rondte.

Uit dit een en ander blijkt genoegzaam, dat de afleiders met veel zorg moeten worden in orde gehouden. Veelal maakt men ze van ijzer, maar voorziet ze dan van eene punt van koper of zelfs van platina, omdat dit niet oxydeert. Geheel van koper vervaardigde zijn de beste, maar veel kostbaarder. Men behoort zich ook gedurig te overtuigen, dat er geene afbrekingen bij de staven plaats hebben; was dit toch het geval, dan zou de afleider het gevaar eer vermeerderen dan verminderen.

B. GALVANISCHE ELECTRICITEIT.

270. **Opwekking van electriciteit door scheikundige werking.** — Behalve de verschillende middelen om electriciteit op te wekken, waarvan wij in de voorgaande afdeeling hebben melding gemaakt, zijn er nog andere, welke wij opzettelijk niet te gelijk met die hebben vermeld, omdat de aard der verschijnselen, welke daardoor worden te weeg gebragt, in sommige opzigten aanmerkelijk van die der wrijvings-electriciteit verschilt. Daar dit onderscheid bij de behandeling zelve zal in 't oog vallen, en ook beter zal begrepen worden, wanneer wij de eigenschappen hebben leeren kennen, zullen wij thans daarover niet uitwijden, maar aanstonds tot de behandeling der verschijnselen over gaan.

Fig. 247.

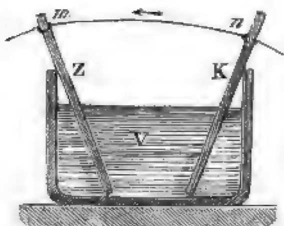


Op eenen gevoeligen electrometer, zooals in de fig. 230 afgebeelde, wordt de knop A door eene zinken plaat M (Fig. 247) vervangen. Op deze plaat legt men eene dunne glazen plaat N, en schenkt op deze voorzigtig eenige druppels verdund zwavelzuur. Vervolgens neemt men eene reep zink, waaraan men twee isolerende handvatsels D en E bevestigd heeft, en buigt die in den door de figuur aangewezen vorm CDEF, zorg dragende, dat het uiteinde C tegen de zinken plaat M aankomt, terwijl het andere in de vloeistof P gedompeld is. Het verdund zwavelzuur werkt op het zink; het water wordt ontleed in zuurstof en waterstof, waarvan de laatste als een gas ontwijkt, terwijl de eerste zich met het zink verbindt tot zinkoxyd, dat met het zwavelzuur een zout, zwavelzuur zinkoxyd, vormt. Heeft

deze scheikundige werking eenigen tijd geduurd, dan verwijdert men door middel van de isolerende handvatsels D en E eerst de zinken reep CF en daarna de glazen plaat met de vloeistof. Zoodra deze verwijderd zijn, bemerkt men aan het afwijken der goudblaadjes van den electrometer, dat zij electrisch geworden zijn; dat zij niet aanstonds afweken, moet alleen daaraan worden toegeschreven, dat de aanwezige electriciteit gebonden was, en zich niet over het geheele metalen gedeelte van den electrometer verspreidde, dan nadat de glazen plaat met de vloeistof verwijderd was. Onderzoekt men den aard der opgewekte electriciteit, dan bevindt men, dat zij negatief is.

De oorsprong van deze electriciteit moet in de scheikundige werking van het zuur op het metaal gezocht worden. Dit wordt ook daardoor bevestigd, dat men hetzelfde waarneemt, als men de zinken plaat en reep vervangt door een ander metaal, waarop de vloeistof werken kan. Bij zink is echter de werking de sterkste; dit metaal neemt het meest negatieve electriciteit op, terwijl de vloeistof positief electrisch wordt. Er heeft dus hier, even als door wrijving en andere mechanische middelen, eene scheiding der beide tegenovergestelde electriciteiten plaats, waarvan de eene zich in het metaal, de andere zich in de vloeistof vertoont. Eene vereeniging der beide electriciteiten kan niet plaats hebben, zoolang de werking duurt, daar juist op de eenige plaats, waar die vereeniging zou kunnen geschieden, namelijk daar waar het metaal en de vloeistof met elkander in aanraking zijn, door de scheikundige werking onophoudelijk de tegenovergestelde electriciteiten gescheiden worden.

Fig. 248.



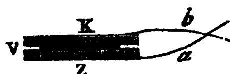
271. **Electrische stroom.** — Wordt een stuk zink Z (Fig. 248) gedompeld in een glas, waarin zich verdund zwavelzuur bevindt, dan zal ook daar, even als bij de zoo even vermelde proef, eene scheikundige werking plaats hebben, blijkbaar aan het ontwijkende waterstofgas, en tengevolge van deze, ontwikkeling van electriciteit, namelijk van negatieve in het zink en positieve in de vloeistof. Plaatst men nu in de zelfde vloeistof bovendien eene roodkoperen plaat K, dan veranderen de verschijnselen niet; het verdunde zuur werkt niet op het koper, daar zijne verwantschap tot zink veel grooter is. Brengt men echter de beide metalen met elkander in aanraking, hetzij onmiddellijk, hetzij door een koperdraad *mn* aan beide vast te maken, dan neemt men eene verandering waar. De gasbellen ontstaan dan niet meer aan de oppervlakte van het zink, maar aan die van het koper, als

of de scheikundige werking aldaar plaats vond; het koper blijft nogtans onaangetast, en in de vloeistof wordt het zwavelzuur zinkoxyd opgelost, even als toen het koper zich niet in de vloeistof bevond. Is de koperdraad *mn* zeer dun en zijn de platen Z en K groot, dan neemt men aan den draad warmte, zelfs gloeijing waar. Heeft men aan elke metaalplaat een koperdraad bevestigd, en brengt men deze bij elkander, dan bemerkt men eene kleine vonk.

Het in de vloeistof gedompelde koper neemt de positieve electriciteit van de vloeistof aan; het zink daarentegen wordt negatief electrisch; door den draad *mn* heeft de vereeniging der beide electriciteiten plaats. De positieve stroomt als 't ware van de koperen plaat door den verbindingsdraad naar de zinkplaat. Daar echter de scheikundige werking steeds voortgaat, zoo wordt er in de zinkplaat onophoudelijk negatieve, in de vloeistof en in de koperplaat steeds positieve electriciteit opgewekt. De vereeniging der beide electriciteiten is dus niet, zooals bij de ontlading der Leidsche flesch, eene plotselinge, maar voortdurend begeeft zich de positieve electriciteit van het koper door den draad naar het zink, terwijl de negatieve den tegenovergestelden weg volgt. De electriciteit is dus hier onophoudelijk in beweging; daarom noemt men haar in dit geval bewegings-electriciteit, of nog algemeener een electrischen stroom. Er zijn dus eigenlijk twee stroomen, die van de positieve electriciteit, die zich in de rigting van het pijltje in fig. 248 beweegt, en die van de negatieve, welke de tegenovergestelde rigting volgt. Men heeft echter als regel aangenomen, wanneer men van een electrischen stroom spreekt, daarmede den positieven stroom te bedoelen, welke blijkens het voorgaande van het koper door den draad naar het zink stroomt.

Een toestel, zoo als in in fig. 248 is afgebeeld, en bestaande uit twee door een geleider verbonden metalen, die beide in eene vloeistof gedompeld zijn, zoodat er een electrische stroom ontstaat, noemt men een *galvanisch element*, een *keten* of eene *cel*. De naam is afkomstig van Galvani, die in 1790 het eerst den electrischen stroom ontdekte. Wij zullen later verschillende soorten van galvanische elementen of cellen leeren kennen; eene zeer eenvoudge constructie vermelden wij echter nog hier. Men neemt een zinkplaatje Z (Fig. 249), waaraan men een koperdraad *a* gesoldeerd heeft; op dit plaatje legt men een met verdund zuur doortrokken wollen lapje V en daarop een koperplaatje K, met een koperdraad *b* voorzien. Even als in het zoo even beschreven geval zal hier electriciteit worden opgewekt, en zoodra de draden *a* en *b* met elkander in aanraking zijn gebragt, ontstaat er een stroom. Een dergelijk element vervaar-

Fig. 249.



digt men door een zilveren muntstuk, bijv. een gulden, onder de tong en een even groot stuk zink daarboven te houden. Brengt men de beide metalen dan met elkander in aanraking, dan bemerkt men een sterken smaak, die voortduurt zoolang als de aanraking duurt. Ook hier heeft een electrischen stroom plaats, waarvan de oorzaak moet gezocht worden in de scheikundige werking van het vocht in den mond op het zink.

De beide uiteinden van het galvanische element, waarheen zich de tegenovergestelde electriciteiten begeven, noemt men *polen*. De pool, waar zich de positieve electriciteit ophoopt, in fig. 248 dus K, heet de *positieve pool;* die, waarheen de negatieve electriciteit zich begeeft, wordt *negatieve pool* genoemd. Aan de draden, welke aan de polen bevestigd zijn, en waardoor de vereeniging der beide electriciteiten plaats heeft, in andere woorden, waardoor de electrische stroom gaat, geeft men den naam van pooldraden of *electroden*. Eerst dan, wanneer de beide electroden aan elkander gebragt worden, of wanneer de beide polen door een geleidend ligchaam verbonden worden, ontstaat er een stroom; men zegt dan, dat de keten *gesloten* is.

Eene beschrijving van de werktuigen, waarvan men zich bedient om de sterkte van eenen galvanischen stroom te meten, kan hier nog niet gegeven worden, omdat men daartoe eerst de werkingen van dien stroom moet leeren kennen. Ten einde echter van die toestellen een denkbeeld te geven, waardoor ook het begrip van hetgeen verder volgen zal gemakkelijker zal zijn, vermelden wij hier het volgende.

De werking van eenen electrischen stroom bestaat daarin, dat hij òf in eenen geleider warmte ontwikkelt, òf eene zamengestelde stof in hare elementen ontleedt, òf eene magneetnaald doet afwijken van hare natuurlijke rigting van het noorden naar het zuiden. De werktuigen, waarvan men zich tot meting der sterkte van stroomen bedient, berusten op eene dezer eigenschappen, en meestal op eene der twee laatstgenoemde. Die, waarbij scheikundige ontleding van eene zamengestelde stof plaats heeft, heeten *voltameters;* gewoonlijk is water de stof, welke daarin door den electrischen stroom ontleed wordt; hoe grooter de hoeveelheid van het in een bepaalden tijd ontlede water is, des te sterker is de stroom. Een veel gevoeliger werktuig, waardoor zeer zwakke stroomen kunnen worden aangewezen, is de *galvanometer*, die hiervoor bij de warmte (156) reeds onder den naam van multiplicateur vermeld en in fig. 162 bij R afgebeeld is. Worden de pooldraden van een galvanisch element met de draden Q en Q′ in verbinding gebragt, dan neemt men eene afwijking van de magneetnaald *a* waar, die des te aanzienlijker zal zijn, naarmate de stroom sterker is. Over de zamenstelling van deze beide toestellen zullen wij

later in meer bijzonderheden treden, als wij de verschijnselen meer van nabij hebben leeren kennen, die door de scheikundige en de magnetische werking van den stroom worden te weeg gebragt.

De galvanische electriciteit heeft slechts weinig spanning; in dit opzigt verschilt zij dus aanmerkelijk van de wrijvings-electriciteit. Daarvan kan men zich gemakkelijk overtuigen door de zinkplaat van een element met een electrometer in verband te brengen; men zal dan geene afwijking der goudblaadjes bemerken. Daarom geeft men veelal aan de wrijvings-electriciteit, ten einde haar van de galvanische te onderscheiden, den naam van spannings-electriciteit. In tegenstelling van die, welke bij den electrischen stroom wordt waargenomen, noemt men haar ook dikwijls electriciteit in rust, hoewel, zooals wij bij de verschijnselen der ontlading gezien hebben, die naam haar niet geheel toekomt.

272. **Opwekking van electriciteit door aanraking.** — Men heeft lang in de meening verkeerd, en velen verkeeren nog daarin, dat de opwekking van electriciteit, zooals in het voorgaande geval, niet moet worden toegeschreven aan scheikundige werking, maar alleen aan de aanraking van metalen onderling of met vochten. Men tracht het dan zoodanig te verklaren, dat door die aanraking electriciteit wordt opgewekt, en dat deze weder moet worden beschouwd als de oorzaak der scheikundige werking. De ontdekking zelve en de aanvankelijk van het verschijnsel gegevene verklaring hebben tot deze theorie, gewoonlijk de *contact-theorie* genoemd, aanleiding gegeven. Wij zullen dus, alvorens verder te gaan, daarvan met een enkel woord melding maken.

Galvani, hoogleeraar in de ontleedkunde te Bologna, bestudeerde den invloed der electriciteit op het zenuwstelsel der dieren, vooral van den kikvorsch. Te dien einde had hij eenige geprepareerde achterpooten van deze dieren door middel van koperen haken aan een ijzeren traliewerk opgehangen. Toen nu die pooten toevallig met het ijzer in aanraking kwamen, nam hij daarin sterke trekkingen waar. Deze proef op andere wijzen herhalende, kwam hij weldra tot de overtuiging, dat die trekkingen telkens plaats grepen, wanneer de vrije uiteinden van twee met elkander in aanraking zijnde metalen gelijktijdig met de kikvorschpoot in aanraking werden gebragt.

De verklaring, welke Galvani van dit verschijnsel trachtte te geven, was onvoldoende. Weldra echter hield Volta, te Pavia, zich met deze zaak bezig en kwam tot het besluit, dat, hoewel de oorzaak van het door Galvani waargenomen verschijnsel gedeeltelijk moet gezocht worden in den kikvorsch, de onderlinge aanraking van twee verschillende metalen noodig was tot het gelukken der proef. Volgens hem moest er zoowel bij de aanraking van vaste

geleiders, als bij de aanraking van een vasten met een vloeibaren geleider, ontwikkeling van electriciteit plaats hebben.

De proef, waarop hij deze leer grondde, kan gemakkelijk herhaald worden met zijnen hiervoor (264) beschreven electrometer met condensator (Fig. 245). Op de bovenste koperen plaat drukt men den natgemaakten vinger, terwijl men de onderste met een stuk zink aanraakt. Verwijdert men vervolgens zoowel den vinger als het zink, en neemt men daarna de bovenste plaat weg, dan zullen de goudblaadjes afwijken en bij onderzoek bevonden worden positief electrisch geworden te zijn. Men kan ook op de volgende wijze te werk gaan; men neemt twee even groote plaatjes van zink en van roodkoper, die goed zijn gereinigd en voorzien van twee isolerende handvatsels; deze drukt men tegen elkander, en brengt aanstonds daarna de eene, bijv. de zinkplaat, bij een gevoeligen electrometer. Herhaalt men dit eenige malen, dan zal men bevinden, dat de electrometer positief electrisch geworden is, wanneer men den knop met het zink heeft aangeraakt.

Men zal inzien, dat deze en dergelijke proeven als voldoende beschouwd werden om aan te nemen, dat door aanraking of contact electriciteit ontwikkeld wordt. In latere tijden echter hebben vele natuurkundigen beweerd, dat aanraking alleen niet voldoende is tot ontwikkeling van electriciteit. Proeven door de la Rive, Faraday en anderen in het werk gesteld, hebben het meer en meer waarschijnlijk gemaakt, dat de verschijnselen alleen moeten worden toegeschreven aan eene scheikundige werking, hoofdzakelijk bestaande in eene oxydatie der metalen, vooral van het zink, door de in de lucht aanwezige dampen. Wij zullen bovendien, wanneer wij de verschijnselen en hunne wetten meer van nabij hebben leeren kennen, zien dat ook om andere redenen de contact-theorie onhoudbaar is, als strijdig met de tegenwoordig aangenomene algemeene grondbeginselen der natuurkunde.

273. **Nadere beschouwing van de scheikundige theorie van den galvanischen keten.** — In de verschillende hiervoor vermelde gevallen, waarin een electrische stroom werd opgewekt, waren twee metalen aanwezig, waarvan het eene eene grootere verwantschap tot zuurstof had dan het andere. Men zal dus het belang inzien, dat de verschillende metalen in zoodanige reeks gerangschikt worden, dat elk volgend metaal meer verwantschap tot zuurstof heeft dan het voorgaande. Volgens de in het werk gestelde onderzoekingen is die reeks de volgende:

Platina.
Goud.

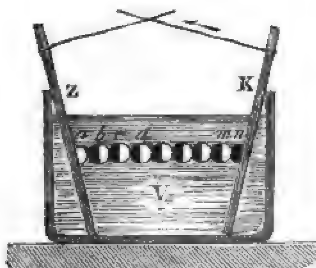
Zilver.
Kwikzilver.
Koper.
IJzer.
Lood.
Tin.
Zink.

Met twee van de hier opgenoemde metalen en eene vloeistof zal men dus een galvanischen keten kunnen zamenstellen. Daar zink het meest van allen verwantschap heeft tot zuurstof, zoo is dit het best geschikt om eene krachtige scheikundige werking en daardoor ook eene sterke ontwikkeling van electriciteit te verkrijgen. Gebruikt men verdund zwavelzuur, dan wordt er, zoo als wij reeds opmerkten, zwavelzuur zinkoxyd gevormd, dat zeer oplosbaar is en zich dus in de vloeistof verspreidt, in plaats van zich, zooals met enkele andere moeijelijk oplosbare zouten het geval zoude zijn, aan de oppervlakte van het metaal neêr te zetten en daardoor de werking te verminderen. De tweede metalen plaat dient, zooals wij zagen, hoofdzakelijk als geleider voor de ontwikkelde electriciteit; in plaats van een koperen, zoo als in de hiervoor beschrevene galvanische elementen, kan men dus elk ander der bovengenoemde metalen gebruiken, dewijl allen minder verwantschap tot zuurstof hebben dan zink. Daar echter de sterkte van de werking afhangt van het verschil in verwantschap van beide metalen tot zuurstof, zoo zal de electrische spanning des te sterker zijn, naarmate de twee metalen in bovengemelde reeks verder van elkander verwijderd zijn; zink met koper geeft dus eene sterkere werking dan zink met ijzer; zink met platina eene nog sterkere. Het is bovendien niet volstrekt noodig, dat het tweede vaste ligchaam een metaal zij, zoo het slechts eene goede geleider is. Daarom heeft men in den laatsten tijd zeer veel gebruik gemaakt van kool of graphiet, waarop het zuur geene werking uitoefent, en dat in bovenstaande reeks nog boven het platina zou moeten geplaatst worden. Wel is waar is kool niet zulk een goede geleider voor de electriciteit als de meeste metalen; maar zijn moleculaire toestand is van dien aard, dat steeds eene aanzienlijke oppervlakte met de vloeistof in aanraking is, waardoor het geringe geleidend vermogen ruim vergoed wordt.

Er is bij de eerstgemelde proef (271) nog eene zaak onverklaard gebleven, namelijk de ontwikkeling van waterstofgas aan de oppervlakte van het koper, zoodra het koper en het zink door middel van den metaaldraad met elkander in verbinding worden gebragt, en de keten dus gesloten is. Men kan dit

verschijnsel aldus verklaren. Alle deeltjes, tusschen het zink en het koper gelegen, worden ontleed; het best kan men zich daarvan een denkbeeld vormen door de voorstelling in fig. 250. Door de scheikundige werking aan

Fig. 250,



de oppervlakte van de zinkplaat Z wordt een water-molecule ontleed in een zuurstof- en een waterstof-molecule; het eerste verbindt zich met het zink; het laatstgenoemde *a*, in plaats van in den gasvormigen toestand te ontwijken, verbindt zich met een zuurstof-molecule van het naastliggende water-molecule *b*, dat door de werking van den stroom eveneens ontleed wordt. Het daardoor vrij wordende waterstof-molecule van *b* verbindt zich op gelijke wijze met het zuurstof-molecule van het daarop volgende deeltje *c*, en zoo verder tot het water-molecule *m*, dat op gelijke wijze ontleed wordt, en waarvan het waterstof-molecule zich verbindt met het zuurstof-molecule van het onmiddellijk tegen de koperplaat K aankomende waterdeeltje *n*, waarvan de waterstof, zich niet weder met zuurstof kunnende verbinden, in den gasvormigen toestand ontwijkt. Er heeft dus in de geheele reeks van moleculen tusschen Z en K eene opeenvolging van ontledingen en verbindingen plaats. Men onderstelt, dat de moleculen door de werking vanden stroom zoodanigen stand aannemen of, zoo als men het noemt, gepolariseerd worden, dat telkens een waterstof-molecule van het eene waterdeeltje gekeerd is naar en aangetrokken wordt door een zuurstof-molecule van het volgende waterdeeltje.

Daar de scheikundige werking van de vloeistof op het metaal oorzaak is van de electrische werking, zoo geeft men aan de metalen, die als zoodanig gebruikt worden, den naam van *electromotoren*. Worden twee der metalen, in de reeks op bladz. 406 en 407 voorkomende, tegelijk in verdund zwavelzuur gedompeld, dan is het laatste steeds de sterkere electromotor ten opzigte van het voorgaande; zink is dus in alle gevallen de sterkste electromotor. De kracht, waarmede de moleculen der vloeistof, waarin de beide metalen zich bevinden, gepolariseerd worden, dat is eenen bepaalden stand aannemen door de werking van den galvanischen stroom, noemt men *electromotorische kracht*. Zij hangt, in het geval dat slechts een der metalen verwantschap tot zuurstof heeft, zoo als bij zink en platina, alleen af van die verwantschap; hebben daarentegen beide zoodanige verwantschap, zoo als zink en koper, dan moet zij aan het verschil der verwantschappen evenredig zijn.

Uit talrijke proeven is het gebleken, dat als men drie ligchamen uit die reeks neemt, bijv. zink, ijzer en koper, de electromotorische kracht tusschen de beide uiterste gelijk is aan de som der electromotorische krachten tusschen het eerste en het tweede, en tusschen het tweede en het derde. Dit zal duidelijker worden door een voorbeeld in getallen. Stellen wij, dat de electrische spanning van zink, als het in eene zekere vloeistof wordt gedompeld, wordt voorgesteld door het getal 100, die van ijzer door 60 en die van koper door 10. Wordt dus zink in de vloeistof gedompeld, dan verkrijgt het negatieve electriciteit, die men kan voorstellen door — 100, terwijl die van de vloeistof door + 100 wordt aangeduid. Bevindt zich in dezelfde vloeistof ijzer, dan verkrijgt het ijzer — 40, de vloeistof + 40 aan electriciteit. Maar, zoo als wij reeds gezien hebben, het ijzer neemt de positieve electriciteit op, welke de vloeistof door hare scheikundige werking op het zink verkrijgt; daar deze + 100 bedraagt, zoo blijft er voor het ijzer nog + 60 over. Op gelijke wijze vindt men voor de electriciteit van het zink — 60. Hoe grooter nu deze getallen zijn, des te sterker moet de werking wezen, en het is de oorzaak dier werking, welke wij electromotorische kracht genoemd hebben. Hieruit volgt dus, dat de electromotorische kracht van zink en ijzer in de hier onderstelde vloeistof evenredig moet zijn aan het verschil tusschen de hoeveelheden electriciteit, welke zij elk op zich zelf in die vloeistof verkrijgen. De electromotorische kracht tusschen ijzer en koper wordt dus eveneens voorgesteld door het verschil tusschen de getallen 40 en 10, dus door 30; die tusschen zink en koper door de som van de electromotorische kracht 60, tusschen zink en ijzer, en van de electromotorische kracht 30, tusschen ijzer en koper, dus door 90, welk getal inderdaad het verschil is tusschen de getallen 100 en 10, welke de hoeveelheden electriciteit aanduiden, die zink en koper in de vloeistof verkrijgen.

De vloeistof, waarin de beide metalen gedompeld zijn, is van het meeste gewigt, daar zij eene dubbele taak te vervullen heeft; in de eerste plaats moet zij gemakkelijk kunnen ontleed worden, in de tweede plaats moet zij een goede geleider zijn. Water voldoet zeer goed aan de eerste voorwaarde; maar de scheikundige werking van water op de meeste metalen is zeer zwak, en bovendien is het een zeer onvolkomen geleider. Door bijvoeging van een zuur wordt echter de scheikundige werking aanzienlijk vermeerderd, terwijl bovendien de geleidbaarheid zeer toeneemt. Daarom is een sterk verdund zuur het meest geschikt tot opwekking van electriciteit.

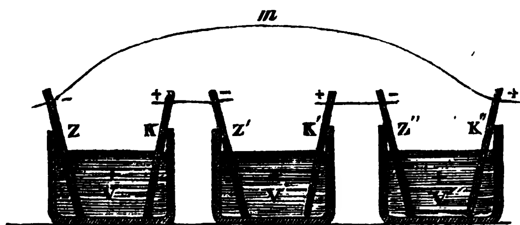
Uit het voorgaande zoude men opmaken, dat tot een galvanisch element twee verschillende metalen en eene vloeistof noodig zijn. Dit is echter geen

volstrekt vereischte. De oorzaak van de electrische werking moet gezocht worden in de verschillende verwantschap van de beide metalen tot zuurstof. Heeft men dus een zelfde metaal, maar in twee verschillende moleculaire toestanden, zoodat de werking van de vloeistof op beide niet gelijk is, dan zal men ook daardoor een electrischen stroom kunnen verkrijgen. Dit is bevestigd door proeven met twee stukken zink, waarvan het eene glad, het andere zeer ruw was, zoodat het verdund zwavelzuur niet op beide even sterk werkte. Men verkreeg inderdaad, zoodra men door een koperdraad de beide oppervlakten met elkander in verbinding had gebragt, een positieven electrischen stroom van dat gedeelte, waar de werking de geringste was, naar het andere.

Om gelijke redenen kan men ook een electrischen stroom verkrijgen door een metaal en twee vloeistoffen, die verschillend op dat metaal werken. Neemt men bij voorbeeld een glas, dat in twee goed afgesloten gedeelten is verdeeld door middel van eene zinkplaat, en schenkt men in het eene gedeelte verdund zwavelzuur, in het andere eene oplossing van gewoon keukenzout, dan zal men, wanneer men de twee vloeistoffen door middel van een metaaldraad met elkander in verbinding brengt, een electrischen stroom verkrijgen.

274. **Galvanische kolom of batterij.** — Wij hebben ons tot dusverre nog alleen bezig gehouden met de electrische werking in één element; wij moeten thans nagaan, hoe men door verbinding van meerdere elementen de werking kan doen toenemen.

Fig. 251.



Beschouwen wij te dien einde in de eerste plaats eenige met elkander verbonden elementen, zoo als in fig. 251 is voorgesteld. In het eerste element heeft aan de oppervlakte van het zink Z scheikundige werking plaats, waardoor het zink negatief, de vloeistof positief electrisch wordt; hetzelfde heeft plaats in elk der volgende elementen aan de oppervlakte van Z′ en Z″, zoodat ook de vloeistoffen V′ en V″ eene gelijke hoeveelheid positieve electriciteit verkrijgen als V, in de onderstelling namelijk, dat deze elementen alle dezelfde afmetingen hebben, en dat er dus in elk evenveel electriciteit ontwikkeld wordt. De positieve electriciteit der vloeistof wordt echter opgenomen

door de koperen geleiders K, K', K'', en daar K met Z', en K' met Z'' verbonden is, zoo zal de positieve electriciteit in K en K' juist geneutraliseerd worden door de negatieve in Z' en Z''. Ten slotte blijft er dus alleen in de beide uiteinden Z en K negatieve en positieve electriciteit over, die zich door den draad *m* vereenigende, aanleiding geven tot een electrischen stroom. Uit dit voorbeeld blijkt, dat de hoeveelheid electriciteit dezelfde is als wanneer men slechts een enkel element heeft; wel te verstaan, wanneer de ontwikkeling niet door uitwendige middelen, die wij later zullen leeren kennen, wordt tegengehouden; de spanning daarentegen en dus ook de sterkte van den electrischen stroom, wanneer men den keten sluit, is toegenomen, en zoude in het hier behandelde geval driemaal grooter zijn geworden, indien de tegenstand door onvolkomen geleiding der vloeistof de sterkte van den stroom niet verminderde.

De electromotorische kracht moet toenemen met het aantal elementen. In elk element toch werkt deze kracht daar, waar de scheikundige werking van de vloeistof op het zink plaats heeft. Had er nu alleen werking plaats in het eerste element, doch niet in het tweede, dan zoude nogtans het zink Z' in het tweede element, in verbinding zijnde met het koper K in het eerste, van dat koper eene polariteit ontvangen, even groot als die van het koper, welke het vervolgens aan de vloeistof V' zoude mededeelen. Daar nu echter het zink Z' en de vloeistof V' eene gelijke polariserende werking op elkander uitoefenen, zoo zal de totale werking gelijk zijn aan de som, dus in dit geval aan het dubbel van de polariserende werking in één element. Bovendien zal de polariserende werking van Z', die het in het tweede element verkrijgt, zich mededeelen aan het koper K, de vloeistof V en het zink Z van het eerste element, zoodat de electromotorische kracht in beide elementen verdubbeld moet zijn. Voor drie elementen is de redenering dezelfde; de electromotorische kracht zal dan driemaal grooter zijn.

Deze eigenschap is volkomen bevestigd door de proeven van Pouillet en Wheatstone, waaruit duidelijk is gebleken, dat de electromotorische kracht evenredig is aan het getal cellen, mits deze onderling gelijk zijn. Daarentegen blijft zij onveranderd, wanneer het aantal cellen hetzelfde blijft, maar hare afmetingen veranderd worden. Van twee elementen, die op gelijke wijze zijn zamengesteld, maar waarbij de oppervlakte van het zink in het eene tweemaal grooter is dan in het andere, zal dus bij het eerste wel de hoeveelheid electriciteit grooter zijn, maar de spanning en de electromotorische kracht blijven dezelfde.

De in fig. 251 voorgestelde verbinding van galvanische elementen is het eerst door Volta (1800) uitgedacht. Men noemt die eene *galvanische batterij* of

kolom. Deze laatste benaming moet worden toegeschreven aan den oorspronkelijken vorm, dien Volta daaraan heeft gegeven, en die is voorgesteld in fig. 252. Tusschen drie houten of glazen staven worden achtervolgens opgestapeld een koperplaatje, een zinkplaatje, een met verdund zwavelzuur bevochtigd wollen lapje, vervolgens weer een koperplaatje, een zinkplaatje, een lapje en zoo vervolgens, tot men ten laatste met een koper- en een zinkplaatje eindigt; aan het onderste en aan het bovenste plaatje zijn koperdraden bevestigd; door deze bij elkander te brengen wordt de keten gesloten en ontstaat er een electrische stroom, zooals men aanstonds bemerkt, wanneer men de pooldraden met eenen voltameter of met eenen galvanometer in verbinding brengt. Raakt men de beide draden gelijktijdig aan, voordat de keten gesloten is, dan gevoelt men een hevigen schok. Als vloeistof neemt men doorgaans water met $\frac{1}{10}$ zwavelzuur, of ook wel met $\frac{1}{12}$ zwavelzuur en $\frac{1}{10}$ salpeterzuur.

Fig. 252.



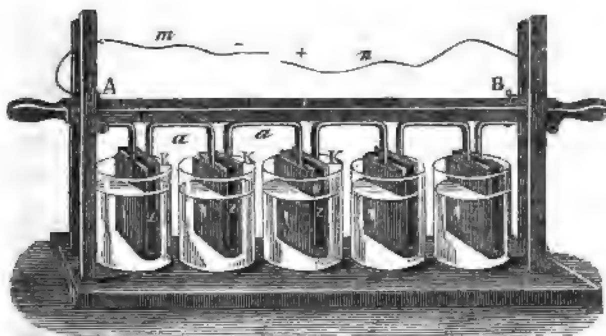
De werking in de kolom van Volta laat zich aldus verklaren. Het verdund zuur in het onderste lapje werkt op het zich daaronder bevindende zinken plaatje, dat dus negatief electrisch wordt. Die negatieve electriciteit wordt medegedeeld aan het koperplaatje, dat daaronder ligt en dus den negatieven pool vormt. Aan het bovenste uiteinde ligt het lapje ook op een zinkplaatje, en wordt dus positief electrisch; de positieve electriciteit wordt dan medegedeeld aan het daarop liggende koperplaatje en door dit weder aan het bovenste zinkplaatje, dat dan de positieve pool vormt. Men heeft dus hier, in strijd met het vroeger aangetoonde, aan het koper-uiteinde den negatieven, aan het zink-uiteinde den positieven pool; men zal echter inzien, dat de beide uiterste plaatjes kunnen worden weggelaten, zonder dat er in de spanning en in de sterkte van den stroom iets veranderd wordt. Men moet zich daarbij evenwel herinneren, dat de boven aangewezene zamenstelling der kolom afkomstig is van Volta zelven, die in het contact tusschen koper en zink de oorzaak van den stroom meende te moeten zoeken. Onderzoekt men de geheele kolom, voor dat zij gesloten wordt, dan bevindt men, dat het bovenste gedeelte positief electrisch, het benedenste negatief electrisch is, en dat de spanning van

het midden af, waar er geene wordt waargenomen, tot aan de uiteinden toeneemt.

De kolom van Volta wordt tegenwoordig niet meer gebruikt; het is dus alleen om hare geschiedkundige waarde, dat wij er melding van gemaakt hebben. Hetzelfde is het geval met verscheidene andere zamenstellingen, die thans ook door betere vervangen zijn. Wij bepalen ons dus in de volgende bladzijden tot de voornaamste thans nog gebruikelijke galvanische elementen en batterijen.

275. **Batterij van Wollaston.** — De batterij van Wollaston is afgebeeld in fig. 253.

Fig. 253.

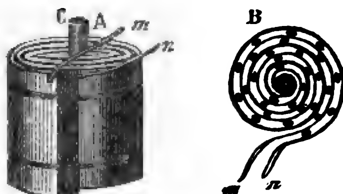


Zij komt, wat inrigting aangaat, het meest met de vroeger beschrevene overeen. De koperplaten, K zijn om de zinkplaten Z gebogen zonder ze aan te raken; alle platen zijn aan de houten stang AB vastgemaakt, terwijl elke koperplaat door middel van eene reep koper *a* met de volgende zinkplaat verbonden is. Aan het zink in het eerste element is eene reep koper verbonden, waaraan de koperdraad *m* bevestigd is, welke dus de negatieve pool uitmaakt; aan het koper in den laatsten beker bevindt zich een draad *n*, welke dus de positieve pool voorstelt. Wil men de batterij gebruiken, dan schenkt men verdund zuur in de bekers of in een porseleinen trog met evenveel afdeelingen als er elementen zijn, en dompelt den geheelen toestel daarin.

276. **Galvanische keten of calorimotor van Hare.** — Somtijds is het noodig eene galvanische keten te hebben, waar niet zoozeer de stroomsterkte en de electromotorische kracht aanzienlijk zijn, maar wel de hoeveelheid electriciteit, die ontwikkeld wordt. Daartoe is het blijkens het hiervoor (274) opgemerkte noodig, dat de oppervlakte zeer groot is. Hare (1837) heeft aan dezen eisch voldaan door een element spiraalsgewijze in te rigten.

Hij rolde namelijk om een houten cilinder eene zinkplaat en eene koperplaat, door tusschen gestokene houtjes zorg dragende, dat zij niet met elkander in aanraking kwamen. Zoodanig element is in A (Fig. 254) afgebeeld; B stelt eene doorsnede of plattegrond voor; de ligte streep *m* wijst de zinkplaat, de donkere *n* de koperplaat aan. Aan de uiteinden worden de electroden vastgemaakt, en het element wordt in een vat of pot met verdund zuur gedompeld. Wil men meer elementen onderling verbinden, dan heeft men slechts het koper van het eene door eene metalen reep met het zink van het volgende te vereenigen. De electroden moeten dan bevestigd worden aan het zink van de eerste en aan het koper van de laatste cel. Verbindt men de beide polen door een platina- of ijzerdraad, dan wordt deze aanstonds gloeijend; wegens deze aanzienlijke warmte-ontwikkeling, heeft Hare er den naam van *calorimotor* aan gegeven. Pouillet heeft eene batterij van deze soort laten maken, bestaande uit 11 elementen, waarvan elk bijna 6 vierkante ellen oppervlakte heeft.

Fig. 254.



Bij alle hier vermelde galvanische batterijen, waarbij ontwikkeling van electriciteit plaats heeft tengevolge van de scheikundige werking der vloeistof op het zink, wordt dit metaal langzamerhand opgelost, vooral wanneer het niet scheikundig zuiver is. De la Rive heeft waargenomen, dat volkomen zuiver zink niet of althans bijna niet door verdund zwavelzuur wordt aangetast, maar dat zulks wel het geval is, wanneer het in verbinding is met koper of platina, en daarmede dus een galvanisch element uitmaakt. De sterke werking van het verdunde zuur op het gewone zink, dat met ijzer en cadmium verontreinigd is, schijnt daaraan te moeten worden toegeschreven, dat er tusschen die bijgemengde metalen en het zink electrische stroomen ontstaan, waardoor de scheikundige werking zeer toeneemt. Maakt men dus van zoodanig onzuiver zink gebruik bij eene batterij, dan gaat de werking van de vloeistof op het zink voort, ook dan wanneer de keton niet meer gesloten is. Daar zulks met zuiver zink niet het geval is, is dit bijzonder voor het gemeld gebruik geschikt; men zal begrijpen, dat in dit geval zoowel zink als zuur bespaard wordt, en dat ook de vloeistof na verloop van eenigen tijd minder zout in oplossing zal bevatten. Het is evenwel moeijelijk zuiver zink in genoegzame hoeveelheid daarvoor te verkrijgen. Wordt echter het gewone onzuivere zink, zooals het in den handel voorkomt, met kwikzilver ingewreven,

of zoo als men het noemt, geamalgameerd (1), dan verkrijgt het dezelfde eigenschap als zuiver zink; het wordt in dien toestand slechts zeer weinig door het zwavelzuur aangetast, doch geeft in het galvanisch element eene uitmuntende regelmatige werking, zoodra de keten gesloten is. Eene aldus bereide zinken plaat kan veel langer gebruikt worden dan eene, die deze bewerking niet heeft ondergaan. Men maakt er daarom zoowel in de reeds beschrevene elementen, als in eenige andere, die wij nog later zullen beschrijven, een veelvuldig gebruik van.

277. **Drooge kolom van Zamboni**. — Men heeft getracht door eene andere zamenstelling der galvanische kolom het bezwaar weg te nemen, dat het eene metaal langzamerhand door het zuur wordt opgelost; vooral zij, die meenden, dat enkel aanraking van metalen voldoende was om electriciteit te ontwikkelen, hebben zich daarmede bezig gehouden. Van de verscheidene daartoe in het werk gestelde pogingen, die echter over het algemeen geene zeer gunstige uitkomst hebben opgeleverd, verdient hier de zoogenaamde drooge kolom van Zamboni (1812) vermeld te worden. Om deze zamen te stellen neemt men verzilverd of vertind papier, hetwelk men aan den kant, waar zich geen metaal bevindt, bedekt met eene dunne laag fijn poeder van bruinsteen, dat men door middel van de eene of andere vette zelfstandigheid daarop doet kleven; van dit papier maakt men kleine even groote schijfjes van 2 of 3 duim middellijn, die men alle op elkander legt, zorg dragende dat het zink of het zilver van het eene schijfje steeds in aanraking is met den bruinsteen van het volgende; elk schijfje vormt dan een galvanisch element, even als bij de kolom van Volta, en de aaneenschakeling van al die schijfjes maakt eene galvanische batterij uit. Daar zij zeer dun zijn, kan men ze in grooten getale opeenstapelen; men heeft van deze soort van kolommen gemaakt, die uit bijna 2000 zoodanige schijfjes bestonden. Onder en boven worden zij van een koperen schijfje voorzien, waardoor zij worden zamengedrukt; dat, hetwelk met het bruinsteen in aanraking is, vormt de positieve pool, het andere de negatieve. Dat er inderdaad een electrische stroom plaats heeft als de keten gesloten wordt, daarvan kan men zich door den galvanometer overtuigen.

De electriciteits-ontwikkeling bij de kolom van Zamboni schijnt te moeten worden toegeschreven aan de scheikundige werking van de vochtigheid in het papier op het tin of het zilver. De vochtigheidstoestand van de lucht

(1) Dit geschiedt het best door het eerst met verdund zuur te bevochtigen en het daarna een oogenblik in kwikzilver te dompelen of er mede in te wrijven. Het kwikzilver, dat nog aan de oppervlakte blijft kleven, laat men er zooveel mogelijk afdruppelen, of men veegt het er af.

oefent daarom grooten invloed op hare werking uit. Deze is echter altijd zwak; zij geeft geen schok noch electrische vonk. De werking blijft echter zeer lang voortduren, zoodat men die dikwijls na verloop van jaren nog bemerkt.

Bohnenberger heeft van de zuil van Zamboni gebruik gemaakt om een zeer gevoeligen electrometer te vervaardigen; deze komt, wat uiterlijke gedaante aangaat, geheel overeen met den electrometer met condensator van Volta (264); hij is echter slechts van één goudblaadje voorzien, dat tusschen de boveneinden van twee kleine zuilen van Zamboni is opgehangen. Deze komen namelijk in de plaats van de beide kolommetjes *m* en *n* in fig. 230 of in fig. 245. Men moet echter zorgen, dat zij beide in tegenovergestelden stand geplaatst zijn, zoodat de eene de positieve, de andere de negatieve pool naar boven gekeerd heeft, en dat zij van onderen door eene metaalreep onderling verbonden zijn. Ontvangt nu het goudblaadje eene uiterst geringe hoeveelheid electriciteit, dan wordt het aanstonds aangetrokken door die kolom, waarvan het bovenste uiteinde de tegenovergestelde electriciteit heeft. Men moet hierbij niet uit het oog verliezen, dat men in den aldus ingerigten toestel geen electrischen stroom heeft, daar de keten niet gesloten is, maar alleen spanning van tegenovergestelde electriciteiten aan de beide uiteinden of polen.

278. **Constante batterijen; keten van Daniell.** — De hiervoor beschrevene batterijen, uit twee metalen en eene vloeistof bestaande, lijden alle aan een groot gebrek. In het begin is hare werking krachtig, maar binnen weinige uren neemt zij aanmerkelijk af. Verschillende oorzaken kunnen hiervoor worden bijgebragt. Vooreerst verbindt zich het zwavelzuur met het zink; de scheikundige werking moet dus langzamerhand verminderen, zoo er niet telkens een nieuwe voorraad zuur wordt aangevoerd; maar ook dit is niet voldoende, want de tegenwoordigheid van het opgeloste zwavelzuur zinkoxyd belemmert de werking. Er ontstaan voorts zoogenaamde *secundaire* stroomen in eene rigting tegenovergesteld aan die van den hoofdstroom, welke veroorzaakt worden door de ontleding zoowel van het water als van het daarin opgeloste zout. Wij zullen later meer bepaald op deze secundaire stroomen terugkomen; thans zij het voldoende op te merken, dat zich ten gevolge van de scheikundige werking van den galvanischen stroom aan de oppervlakte van het koper waterstof, zinkoxyd en zelfs metalliek zink neêrzetten, terwijl de zuurstof en het zuur zich naar het zink begeven. Die stoffen geven dan aanleiding tot een nieuwen galvanischen stroom, die, zoo hij in rigting tegenovergesteld is aan den oorspronkelijken stroom, dien noodzakelijk moet verzwak-

ken. Vooral wanneer de keten lang gesloten blijft heeft dit plaats. Opent men haar, dan worden de stoffen, die zich hebben neêrgezet, weder opgelost en mengen zich van zelf door elkander, zoodat dan ook, wanneer de keten, na eenigen tijd geopend te zijn geweest, op nieuw gesloten wordt, de werking krachtiger is dan voor de opening. Het meest geschikte middel om dit bezwaar weg te nemen bestaat daarin, dat men het koper niet in dezelfde vloeistof plaatst, maar in eene andere, waarin zoodanige werking niet kan plaats hebben, en die van de eerste is afgescheiden, zonder dat echter de electrische verbinding is afgebroken. Die tweede vloeistof moet dus geene werking op het koper of op het metaal, dat er de plaats van inneemt, uitoefenen, maar moet de electriciteit goed geleiden; tevens heeft men zorg te dragen dat, zoo er een secundaire electrische stroom ontstaat, deze dezelfde rigting heeft als de eigenlijke stroom van de keten.

Eene der meest gebruikelijke galvanische ketens met twee metalen en twee vloeistoffen is die van Daniell (1836), welke in fig. 255 is afgebeeld. Deze bestaat uit een aarden of glazen vat V, waarin zich eene verzadigde oplossing van blaauw kopervitriool (zwavelzuur koperoxyd) bevindt. Hierin is een van onderen open koperen cilinder K geplaatst, waarvan de bovenrand zoodanig is omgebogen, dat er een gootje gevormd wordt, waarin men kristallen van kopervitriool legt. De koperen cilinder is veelal van gaten voorzien om behoorlijke gemeenschap daar te stellen tusschen het vocht, dat zich er binnen en er buiten bevindt. Binnen in dezen koperen cilinder bevindt zich een poreus potje P van onverglaasd aardewerk, waarin verdund zwavelzuur of eene oplossing van gewoon keukenzout geschonken wordt. In deze vloeistof wordt eene staaf of een cilinder van geamalgameerd zink geplaatst, waaraan eene reep koper verbonden is Eene dergelijke reep bevindt zich aan den buitensten koperen cilinder. Zoolang de aan deze beide uiteinden verbonden koperdraden van elkander gescheiden blijven, wordt er geene werking waargenomen; wordt echter de keten gesloten, dan bemerkt men die aanstonds. Het potje P is van dien aard, dat het de vloeistof langzamerhand doorlaat, doch slechts zooveel, dat de beide vochten zich niet met elkander vermengen. Het zink wordt aangetast door het zuur, en het water wordt ontleed; de zuurstof ver-

Fig. 255.



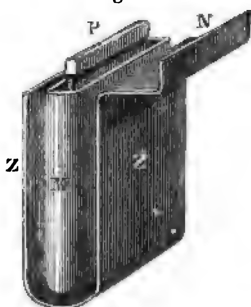
bindt zich met het zink en er wordt een zinkzout gevormd; de waterstof daarentegen begeeft zich naar het koper, waar zij zich met de zuurstof van het koperoxyd, dat de basis van het zwavelzuur koperoxyd uitmaakt, verbindt. Het daardoor vrijwordende metalliek koper wordt op de oppervlakte van den koperen cilinder neêrgeslagen. Het zwavelzuur, dat door de ontleding van het koperzout vrij geworden is, dringt door den poreusen wand van het potje P daar binnen en vervangt het zwavelzuur, dat zich met het zinkoxyd verbonden heeft. Een secundaire stroom in tegenovergestelde rigting, zooals bij de elementen met één vocht, kan hier niet plaats hebben; het koperzout wordt echter ontleed, en het is dus noodig de oplossing steeds op nieuw te verzadigen; te dien einde zijn de kristallen bij G aangebragt, die van zelf opgelost worden, naarmate het zout in de oplossing ontleed wordt. Men ziet, dat bij de keten van Daniell eene meer zamengestelde scheikundige werking plaats heeft, dan bij de elementen met één vocht. Er bestaat echter eene naauwe betrekking tusschen de scheikundige werkingen, die in de beide vloeistoffen plaats hebben, in dier voege, dat men door middel van de scheikundige aequivalenten (25) steeds kan nagaan, hoeveel zink er opgelost en hoeveel koper er aan de oppervlakte van den koperen cilinder neêrgeslagen wordt. Worden er 32,5 wigtjes zink opgelost, dan verbinden deze zich met 8 wigtjes zuurstof; daardoor wordt 1 wigtje waterstof vrij, dat zich weder verbindt met 8 wigtjes zuurstof van het koperoxyd; daar deze 8 wigtjes met 31,7 wigtjes koper verbonden waren, zoo duidt dit laatste getal het gewigt van het herleide koper aan. Er zijn tevens 40 wigtjes zwavelzuur (SO_3) vrij geworden, die de plaats innemen van eene even groote hoeveelheid, welke zich met het zinkoxyd verbonden heeft. Men kan verscheidene elementen van Daniell onderling vereenigen, door het koper van het eene element met het zink van het volgende te verbinden. Doorgaans geschiedt zulks door de uitstekende koperen reepen door klemschroeven stevig tegen elkander te klemmen.

Vroeger gebruikte men, om de beide vloeistoffen van elkander te scheiden, eene blaas of een linnen zak; de afscheiding is dan echter minder volkomen, en na eenigen tijd is de werking minder sterk. Tegenwoordig maakt men algemeen van de poreuse potten gebruik, en verkrijgt daardoor eene werking, die gedurende verscheidene dagen als standvastig kan beschouwd worden, mits men slechts zorg draagt, dat er steeds eene genoegzame hoeveelheid kristallen van het koperzout aanwezig zijn om de vloeistof verzadigd te houden. Hieraan is ook nog dit voordeel verbonden, dat deze vloeistof de electriciteit des te beter geleidt, naarmate de oplossing sterker is. Men zal het belang hiervan inzien, wanneer men in aanmerking neemt, dat zelfs eene verzadigde oplossing

van kopervitriool bij gelijke doorsnede de electriciteit nog ongeveer 1500000 maal minder geleidt dan platina, dat onder de metalen de slechtste geleider is.

279. **Keten van Grove.** — Eene andere inrigting heeft Grove (1839) aan de galvanische keten gegeven, waardoor ook eene zeer standvastige werking verkregen wordt. Hij gebruikte als electromotoren zink en platina, waarvan het eerste in verdund zwavelzuur, het tweede in sterk salpeterzuur of in een mengsel van zwavelzuur en salpeterzuur werd gedompeld, terwijl de beide vochten eveneens door een poreus potje van elkander gescheiden waren, of, zoo als men met meer juistheid zeggen kan, met elkander gemeenschap hadden. Bij de Grove'sche elementen geeft men tegenwoordig veelal aan het zink den in fig. 256 afgebeelden vorm. Aldaar stelt namelijk Z het zink voor, dat om het poreuse potje M heen gebogen is. In dit potje wordt het sterke zuur geschonken en daarin een dun platina plaatje P geplaatst. Het geheel, zooals het in fig. 256 is afgebeeld, wordt in een verglaasden aarden pot met verdund zwavelzuur geplaatst; doorgaans neemt men 1 volume zuur op 6 volumen water. Het platina P vormt de positieve, het uiteinde N van het zink de negatieve pool. Wil men meer elementen tot eene batterij verbinden, dan plaatst men ze naast elkander, en verbindt met klemschroeven den rand P van het platina van het eene element met den rand N van het zink van het volgende, die, zoo de elementen goed vervaardigd zijn, juist tegen elkander aankomen.

Fig. 256.

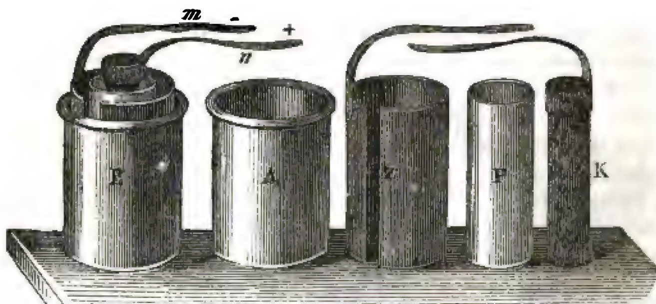


De werking laat zich ook hier gemakkelijk verklaren. Het verdund zwavelzuur werkt op het zink op gelijke wijze als in alle tot dusverre beschreven koper-zink-elementen. De waterstof begeeft zich naar de oppervlakte van het platina, alwaar zij zich verbindt met de zuurstof van het salpeterzuur. Dit verliest de zuurstof en gaat over in eenen lageren oxydatie-trap, namelijk het ondersalpeterzuur, dat gedeeltelijk opgelost wordt, gedeeltelijk gasvormig ontwijkt, en aan den sterk prikkelenden reuk herkend kan worden. Wij hebben hier ook weder geen tegenstroom, maar twee stroomen in dezelfde rigting, de een ontstaande door de ontleding van het water, de andere door die van het zuur. De spanning en de electromotorische kracht zijn sterker dan bij de koper-zink-batterij, daar in de bovengemelde spanningsreeks (273) platina en zink de beide uitersten uitmaken. De werking is dus

krachtig en bovendien nagenoeg standvastig. De batterij van Grove heeft echter dit nadeel, dat de door de ontleding van het salpeterzuur ontstaande gassen, vooral in een gesloten vertrek, zeer nadeelig zijn.

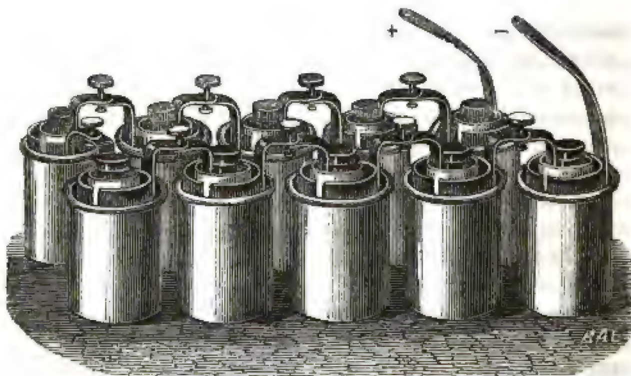
280. **Keten van Bunsen.** — De batterij van Bunsen (1842) verschilt alleen daarin van die van Grove, dat men het platina vervangt door kool of graphiet, en dientengevolge aan de potten eene andere gedaante geeft. Fig. 257 stelt een element van Bunsen voor, zoowel in zijn geheel B, als

Fig. 257.



in zijne zamenstellende deelen. A is een verglaasde aarden pot, waarin de zinkcilinder Z geplaatst wordt. Daarbinnen plaatst men het poreuse potje P,

Fig. 258.



en daarin den massieven koolcilinder K. Deze, zoowel als het zink, is van eene koperen reep voorzien; deze reepen worden onderling door koperdraden verbonden, als men de keten sluiten wil; zij kunnen ook dienen om meer elementen onderling te vereenigen. Zoodanige vereeniging is afgebeeld in fig. 258, welke eene Bunsensche batterij van tien elementen voorstelt. In de buitenste potten wordt verdund zwavelzuur, in de poreuse potjes sterk salpeterzuur geschonken.

De werking in de batterij van Bunsen is volkomen dezelfde als in die van Grove, behalve dat de duurdere platina-plaatjes door de goedkoopere koolcilinders vervangen zijn. De kool veroorzaakt evenmin als het platina eene scheikundige werking; daarom doet ook het laatstgenoemde eene even goede uitwerking, wanneer het slechts een zeer dun plaatje is, als wanneer men het dikker neemt. De dikke plaatjes zijn echter duur, en de dunne vereischen eene zorgvuldige behandeling. Daarom heeft men in den laatsten tijd bij voorkeur van de Bunsen'sche batterijen gebruik gemaakt. De koolcilinders worden doorgaans vervaardigd door poeder van coke en steenkolen in een ijzeren vorm sterk zamen te stampen en dan te verkoolen. In den laatsten tijd heeft men echter op aanraden van Walker (1852) met uitmuntenden uitslag gebruik gemaakt van de kool, welke zich tegen de wanden der retorten in de gasfabrieken aanzet, en die zeer hard en compact is, zoodat men er gemakkelijk stukken van den verlangden vorm en grootte uit kan vervaardigen. In één opzigt staat de batterij van Bunsen bij die van Grove achter; het zuur stijgt namelijk in den koolcilinder door capillaire werking eenigzins op, en tast de daaraan bevestigde koperen ringen of reepen aan, welke dus gedurig moeten worden schoongemaakt; dit is bij de Grove'sche elementen niet noodig. Ook leert de ondervinding, dat bij de Bunsen'sche meer zuur verbruikt wordt, waardoor het voordeel van geringere kosten eenigzins vermindert.

Men heeft in den laatsten tijd verschillende wijzigingen van de batterij van Bunsen voorgesteld, en ook nog andere zamenstellingen uitgedacht, van welke sommige, voor zooverre de ondervinding geleerd heeft, wel schijnen te voldoen. Van deze vermelden wij hier alleen die van Marié-Davy (1859), welke van dezelfde gedaante is als die van Bunsen, maar waarin het salpeterzuur vervangen is door zwavelzuur kwikzilveroxydul en het verdund zwavelzuur door water. Het water wordt even als bij de keten van Bunsen ontleed en het zink geoxydeerd, terwijl de waterstof op het zwavelzuur kwikzilveroxydul werkt, dat gereduceerd wordt, zoodat er zwavelzuur ontstaat, dat zich door den poreusen wand met het zinkoxyd verbindt, en metalliek kwikzilver, dat in het binnenste vat neêrgeslagen wordt. Men heeft met zoodanige bat-

terij proeven genomen voor de telegrafen in Frankrijk, die wel voldaan hebben en haar welligt boven die van Daniell zullen doen verkiezen.

Behalve de onderlinge verbinding van verscheidene elementen, die in fig. 258 is afgebeeld, en welke van dien aard is, dat de electromotorische kracht, zooals wij hebben opgemerkt (274), vermeerdert in dezelfde reden als het aantal elementen, kunnen de cellen ook op andere wijze verbonden worden, zoodat zij de plaats innemen van een geringer aantal elementen van grootere oppervlakte; in dat geval is dus de electromotorische kracht niet zoo aanzienlijk, als bij de hiervoor beschrevene verbinding. Worden bijv. alle zinkplaten onderling verbonden en evenzoo alle koper- of platinaplaten of koolcilinders, dan is het alsof men slechts één enkel element had, waarvan de oppervlakte evenveel maal grooter is, als men elementen gebruikt heeft. Dit geval is voorgesteld door fig. 259, waar alle koolcilinders door metalen staafjes onderling verbonden zijn, zoodat K de positieve pool vormt, terwijl alle zinkplaten op gelijke wijze onderling vereenigd zijn door staafjes, die bij N de negatieve pool vormen. In dit geval heeft men dus eigenlijk slechts één element, hoewel de vloeistof in zes potten verdeeld is. In fig. 260 zijn de koolcilinders der drie bovenste elementen door middel van K verbonden, terwijl door de staven Z de zinkplaten der drie onderste vereenigd zijn. Wij hebben dus hier twee elementen, elk van eene driemaal grootere oppervlakte. In fig. 261 zijn de elementen twee aan twee verbonden, zoodat men daar eigenlijk eene batterij van drie elementen van dubbele afmetingen heeft. Men zal inzien dat men, naar gelang van het geheele aantal elementen, gemakkelijk verschillende verbindingen kan maken.

Fig. 259.

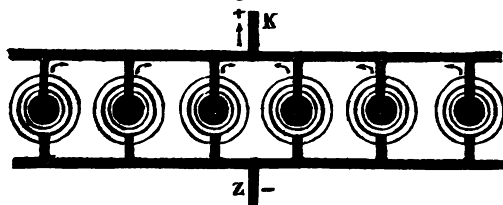


Fig. 260.

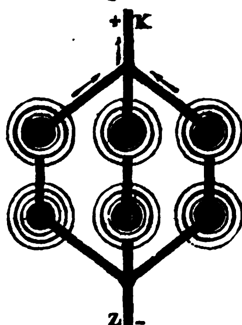
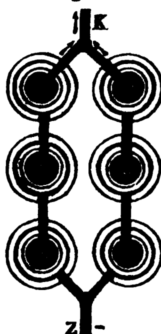


Fig. 261.



281. **Wet van Ohm.** — Alvorens de verschijnselen en de werkingen van den galvanischen stroom nader te beschouwen, zullen wij een begrip trachten te geven van de wet, welke daarbij is waargenomen, en die naar den ontdekker de wet van Ohm (1827) genoemd wordt.

Wij hebben hiervoor (273) reeds gezegd, wat men door electromotorische kracht verstaat, en op grond van waarnemingen aangewezen, welken invloed de afmetingen en het aantal der cellen daarop uitoefenen. Ohm heeft uit theoretische beschouwingen afgeleid, en Pouillet (1835) door zijne proeven bevestigd, dat de sterkte van eenen galvanischen stroom afhangt van de electromotorische kracht en van den wederstand, dien de stroom ondervindt zoowel in den draad, die de beide polen verbindt, als in de cel zelve; zij hebben namelijk bewezen, dat de stoomsterkte evenredig is aan de electromotorische kracht, doch omgekeerd evenredig aan den ondervonden wederstand, zoodat wanneer de stroomsterkte door S, de electromotorische kracht door E en de totale wederstand door R uitgedrukt worden, men als formule mag aannemen

$$S = \frac{E}{R},$$

mits men zorge dat voor elke dezer drie grootheden behoorlijk gekozene waarden als eenheden worden aangenomen; welke die eenheden zijn, zullen wij later aanwijzen (284).

282. **Wetten van den wederstand in de galvanische keten.** — Alvorens tot de nadere beschouwing der formule van Ohm over te gaan, is het noodig het een en ander te laten voorafgaan omtrent de wetten van den wederstand, dien de galvanische stroom in de gesloten keten ondervindt, zonder evenwel daarbij in bijzonderheden te treden omtrent de wijze, waarop die wetten proefondervindelijk kunnen worden bevestigd; het zij voldoende hier op te merken, dat de hiervóór (271) genoemde voltameter en galvanometer daartoe de middelen aan de hand geven.

De wederstand in de cel zelve is van vele omstandigheden afhankelijk. De daarin gebruikte metalen, de aard der vloeistof en hare uitgebreidheid, vooral ook de aard van het poreuse potje, oefenen daarop zoodanigen invloed uit, dat het niet mogelijk is er bepaalde wetten voor op te geven. Voor den wederstand in den geleider, die de beide polen verbindt, zijn de wetten het eerst door Davy uit proefnemingen afgeleid. Deze heeft namelijk aangetoond, dat de wederstand in den sluitdraad evenredig is aan de lengte van dien draad, doch omgekeerd evenredig aan zijne doorsnede. In een korten dikken draad is dus de wederstand het geringst, in een langen dunnen het grootst. Maar ook de

stof, waaruit die draad gemaakt is, oefent een aanzienlijken invloed uit. Wij hebben vroeger reeds melding gemaakt van het verschil in geleidend vermogen bij verschillende metalen; evenzoo is het met den geleidingswederstand gelegen; het laat zich toch gemakkelijk inzien, dat een metaal, dat een slechte geleider is, een grooteren wederstand aan den electrischen stroom moet bieden. Beide, zoowel het geleidend vermogen als de geleidingswederstand, kunnen door middel van getallen worden uitgedrukt; Riess, Pouillet, E. Becquerel en vele anderen hebben proeven in het werk gesteld om die waarden te bepalen. De door hen opgegevene getallen zijn nog al uiteenloopende, hetgeen hoofdzakelijk schijnt te moeten worden toegeschreven aan de meerdere of mindere zuiverheid en digtheid der gebruikte stoffen. De door laatstgenoemden gevondene betrekkelijke waarden voor den geleidingswederstand bij eene temperatuur van 13°, alsmede die van het geleidend vermogen, zijn in de volgende tabel opgenomen.

Metalen.	Geleidingswederstand.	Geleidend vermogen.
Zilver	100,00	100,00
Koper	112,25	89,08
Goud	155,31	64,39
Zink	413,84	24,16
Tin.	732,26	13,66
IJzer	824,82	12,12
Lood . . . . . . , .	1212,90	8,25
Platina . , ...	1243,47	8,04
Kwikzilver	5550,15	1,80

Het verdient opmerking, dat volgens deze onderzoekingen de volgorde der metalen volgens de geleidbaarheid voor de electriciteit dezelfde is als die volgens de geleidbaarheid voor de warmte, welke wij hiervoor op bladz. 250 hebben opgegeven.

De temperatuur oefent op den geleidingswederstand een zeer merkbaren invloed uit, die echter voor alle metalen niet even aanzienlijk is; voor kwikzilver is die het geringst, voor tin het grootst. Bij alle echter neemt de wederstand met de temperatuur toe.

Vloeistoffen zijn veel slechtere geleiders dan de metalen, en oefenen dus eenen grooteren wederstand tegen den electrischen stroom uit. Pouillet

(1837) vond, dat de geleidbaarheid eener verzadigde oplossing van zwavelzuur koperoxyd ongeveer 16500000 maal minder is dan die van koper. Hij onderzocht deze door den stroom te laten gaan door eene buis, met de te onderzoeken vloeistof gevuld. Becquerel heeft ook uitvoerige proeven in het werk gesteld; de uitkomsten zijner onderzoekingen zijn in de volgende tabel vermeld.

Stoffen.	Geleidingswederstand.	Geleidend vermogen.
Zilver	1	100000000
Verzadigde oplossing van zwavelzuur koperoxyd.	18450000	5,42
Verz. opl. van keukenzout . . .	8173000	31,52
Verz. opl. van zwavelzuur zinkoxyd	17330000	5,77
Gewoon salpeterzuur	1606000	93,77
1 deel zwavelzuur met 11 deelen water	1128000	88,68

Deze getallen geven slechts de onderlinge betrekking aan; voor den wederstand is die van het zilver als eenheid aangenomen, terwijl het geleidend vermogen van hetzelfde metaal door het getal 100000000 is voorgesteld. De invloed van de temperatuur is bij vloeistoffen juist de tegenovergestelde van dien bij de metalen; met de warmte neemt de geleidbaarheid toe, en vermindert dus de wederstand. De wederstand hangt overigens bij vloeistoffen evenzoo van de lengte en doorsnede der vochtkolom af als bij de metalen; hij is evenredig aan de lengte en omgekeerd evenredig aan de doorsnede.

Wij mogen hier niet onvermeld laten, dat sommigen, onder anderen van Breda en Logeman (1854), van meening zijn, dat de vloeistoffen geene eigene geleidbaarheid voor den galvanischen stroom bezitten, en dat de voortplanting van den stroom door haar alleen ten gevolge van de scheikundige ontleding plaats heeft, op de wijze zoo als wij hiervóór (273) verklaard hebben.

283. **Nadere gevolgtrekkingen uit de formule van Ohm.** — De formule van Ohm stelt ons in staat om aan te toonen, welken invloed het aantal elementen en hunne afmetingen op de stroomsterkte moeten uitoefenen. Duiden wij te dien einde den wederstand in den sluitdraad aan door r, dien in de cel zelve door r', dan moet in de formule van Ohm R vervangen worden door $r + r'$, zoodat zij wordt

$$S = \frac{E}{r + r'}.$$

Worden nu n even groote elementen zoodanig met elkander verbonden, dat de positieve pool van het eene element verbonden wordt met de negatieve van het volgende, doch dat de pooldraden dezelfde blijven als bij een enkel element en de uitwendige wederstand r dus onveranderd blijft, dan zal, zoo als wij reeds hebben opgemerkt, de electromotorische kracht n-maal grooter geworden zijn, terwijl ook de wederstand r' in de cellen n-maal grooter zal zijn dan in ééne cel. De stroomsterkte in de zamengestelde keten wordt dan uitgedrukt door de formule

$$S' = \frac{nE}{r + nr'}.$$

Hieruit volgt, dat de stroomsterkte toeneemt met het getal der elementen; want brengt men deze formule onder den vorm

$$S' = \frac{E}{\frac{r}{n} + r'},$$

dan blijkt aanstonds, dat S' grooter wordt wanneer n toeneemt. De vermindering der stroomsterkte zal des te aanzienlijker zijn, naarmate r' kleiner is in vergelijking van r, dat is, naarmate de inwendige wederstand in elke cel geringer, en die in den sluitdraad grooter is. Is daarentegen de wederstand r in den sluitdraad zeer klein, zoodat de waarde van de breuk $\frac{r}{n}$ zeer gering is, dan zal de stroomsterkte slechts weinig verschillen van $\frac{E}{r'}$, en dus nagenoeg onafhankelijk zijn van het aantal cellen. Vermeerdering van het aantal cellen baat dus weinig tot versterking van den stroom, wanneer de wederstand in den sluitdraad gering is. Maakt men daarentegen dien wederstand zeer groot, door den draad lang en dun te nemen, dan zal men, om de stroomsterkte te doen toenemen, n zeer aanzienlijk moeten nemen, ten einde den invloed van den term $\frac{r}{n}$ te verminderen. Heeft men dus een grooten wederstand te overwinnen, dan moet men een groot aantal cellen aanwenden.

Beschouwen wij thans het geval, dat n elementen zoodanig met elkander in verband zijn gebragt, dat de gelijknamige polen onderling verbonden zijn,

zoodat men de verbinding eigenlijk als één element met grootere afmetingen kan beschouwen. In dit geval is de electromotorische kracht E dezelfde, daar zij niet afhankelijk is van de grootte van het element; de geleidingswederstand r' in de cellen is daarentegen n-maal kleiner geworden; de oppervlakte toch van het zink, die met de vloeistof in aanraking is, is n-maal grooter geworden; de doorsnede van de vloeistof-kolom, welke den stroom geleiden moet, is dus n-maal toegenomen, en daar de geleidings-wederstand omgekeerd evenredig is aan die doorsnede, zoo is r' n-maal kleiner geworden. De formule van Ohm neemt dus in dit geval dezen vorm aan:

$$S'' = \frac{E}{r + \frac{r'}{n}} = \frac{nE}{nr + r'}.$$

Hieruit blijkt dat, wanneer de wederstand r in den sluitdraad gering is, zoodat de term nr kan worden verwaarloosd, de stroomsterkte met het aantal cellen toeneemt. Is daarentegen de wederstand r' in de cel gering in vergelijking van dien in den sluitdraad r, dan nadert de formule tot $S' = \frac{E}{r}$; de stroomsterkte is dus nagenoeg dezelfde, als wanneer men slechts een element gebruikt had. Hieruit blijkt, dat vermeerdering van het aantal elementen, wier gelijknamige polen onderling verbonden zijn, of wat hetzelfde is, het vergrooten van een enkel element, den stroom wel sterker maakt als men een korten dikken sluitingsdraad heeft, doch niet wanneer die draad lang en dun is, en men dus eene werking op grooten afstand wil doen plaats hebben.

284. **Bepaling van eenige standvastige waarden bij de galvanische ketens.** — Ten einde de stroomsterkte in verschillende galvanische elementen onderling te kunnen vergelijken, is het noodig deze door middel van getallen te kunnen uitdrukken. Wij hebben tot dusverre de scheikundige werking, door den electrischen stroom in eene zamengestelde stof, waardoor hij gaat, veroorzaakt, nog niet van nabij beschouwd; men zal echter, zonder dat wij vooralsnog in nadere bijzonderheden dienaangaande treden, ligt inzien, dat die werking als maat van de stoomsterkte zal kunnen dienen; het gebruik van den voltameter berust dan ook op die onderstelling. Men heeft als eenheid van stoomsterkte een stroom aangenomen, waardoor in 1 minuut zooveel water in den voltameter scheikundig ontleed wordt, dat de door die ontleding ontstane gassen bij eene temperatuur van 0° en eenen barometerstand van 76 duim juist een volume van 1 kub. duim beslaan. Bevindt men dus, dat een stroom in 1 minuut een vo-

lume gas van 10 kub. duimen levert, dan kan men zijne sterkte door het getal 10 uitdrukken.

Ook voor den wederstand heeft men op voorstel van Jacobi eene vaste eenheid aangenomen, namelijk dien, welke wordt uitgeoefend door een scheikundig zuiver en goed uitgegloeid koperdraad van 1 el lengte en 1 streep middellijn. Dat de draad volkomen zuiver koper moet zijn, blijkt daaruit, dat de bijmenging van $\frac{1}{100}$ ijzer voldoende is om den wederstand in de verhouding van 4 tot 5 te doen toenemen.

Heeft men aldus voor stroomsterkte en wederstand vaste eenheden aangenomen, dan volgt uit de formule van Ohm aanstonds, welke de eenheid is voor de electromotorische kracht. Daar namelijk volgens die formule $E = SR$ is, zoo zal de eenheid van electromotorische kracht die zijn, welke plaats heeft in eene cel, waarin de eenheid van wederstand de stroomsterkte tot hare eenheid terugbrengt, dat is, waarin bij een wederstand gelijk aan dien van een koperdraad van ééne el lengte en één streep middellijn in elke minuut door ontleding van water 1 kubieke duim gas gevormd wordt.

Men kan voorts gemakkelijk zoowel de electromotorische kracht als den inwendigen wederstand voor elke cel bepalen. Begint men met proefondervindelijk de stroomsterkte voor een bekenden sluitdraad te bepalen, dan zullen in de formule van Ohm

$$S = \frac{E}{r + r'}$$

S en r bekend zijn. Herhaalt men de waarneming voor een anderen sluitdraad, waarin de wederstand ϱ is, dan zijn in de formule

$$S' = \frac{E}{\varrho + r'}$$

S' en ϱ bekend, terwijl de onbekenden E en r' in beide dezelfde waarden hebben. Uit deze twee vergelijkingen kan men dus beider waarde berekenen; wordt r' geëlimineerd, dan vindt men de waarde van de electromotorische kracht E.

Zoodanige onderzoekingen hebben met verscheidene der hierboven beschrevene constante elementen plaats gehad. Daaruit heeft men voor de electromotorische kracht in de keten van Daniell 470, voor die van Grove 780 en voor die van Bunsen 800 gevonden. Voor de keten van Wollaston bedraagt de electromotorische kracht ongeveer 200; daar de stroomsterkte echter bij deze niet standvastig is en langzamerhand afneemt, wanneer de wederstand

dezelfde blijft, zoo moet ook de electromotorische kracht, die blijkens de wet van Ohm bij gelijken wederstand aan de stroomsterkte gelijkgesteld kan worden, afnemen. De voorgaande getallen zijn onafhankelijk van de afmetingen der elementen, en kunnen dus als standvastige waarden beschouwd worden. Voor den wederstand in de cel, op welken de afmetingen eenen grooten invloed uitoefenen, kunnen echter geen standvastige waarden worden opgegeven.

De geringere waarde der electromotorische kracht bij de keten van Daniell laat zich daardoor verklaren, dat in de eerste plaats in de spanningsreeks op bladz. 406 en 407 zink en koper veel digter bij elkander geplaatst zijn dan zink en platina, en dat dus de electromotorische werking daardoor minder aanzienlijk moet wezen; ten tweede, dat de scheikundige werking en dientengevolge ook de electromotorische kracht tusschen het koper en het zwavelzuur koperoxyd veel geringer is dan die, welke bij de keten van Grove aan de oppervlakte van het platina, bij die van Bunsen aan de oppervlakte van den koolcilinder, plaats heeft.

285. **Physiologische werking van den galvanischen stroom.**— Wij hebben in de voorgaande bladzijden reeds in het voorbijgaan melding gemaakt van enkele uitwerkselen van den galvanischen stroom; wij zullen die thans meer in het bijzonder gaan beschouwen.

De werkingen van den galvanischen stroom kunnen in drie hoofdafdeelingen verdeeld worden, namelijk de physiologische, de physische en de scheikundige werkingen. Omtrent de eerste zullen wij kort kunnen zijn, daar de verschijnselen meer tot het gebied der physiologie of kennis van de levende natuur behooren; wij bepalen ons daarom tot eene korte vermelding der hoofdzaken.

De physiologische werking van den galvanischen stroom op het van leven beroofde dierlijke ligchaam heeft, zooals wij hiervoor (272) hebben medegedeeld, het eerst aanleiding gegeven tot de ontdekking van het galvanisme. Men heeft sedert dien tijd herhaaldelijk proeven genomen om die werking beter te leeren kennen, en is daardoor hoofdzakelijk tot de volgende uitkomsten geraakt.

Op het ligchaam van een mensch, die een natuurlijken dood gestorven is, heeft de electrische stroom geen invloed, doch wel op dat van iemand, die eenen geweldigen en plotselingen dood heeft ondergaan, althans gedurende korten tijd na den dood. Aldini leidde den stroom door het hoofd van een misdadiger, weinige oogenblikken na de onthoofding, en nam sterke bewegingen in de spieren van het aangezigt waar. Ure heeft met eene batterij van 270 elementen vele proeven gedaan op het ligchaam van een misdadiger, een uur nada

hij opgehangen was. De eene pool werd in verband gebragt met het ruggemerg onder den nek, de andere met den hiel, waarin eene insnijding gemaakt was; het been, dat men had zamengebogen, werd met zoo veel geweld uitgestrekt, toen de keten gesloten werd, dat een der omstanders, die het vast hield, omvergeworpen werd. Eene der polen verbonden zijnde met eene zenuw, die de wenkbraauw doet bewegen, terwijl de andere, even als in het zoo even vermelde geval, met den hiel was in verband gebragt, vertrokken de aangezigtspieren zich op eene afschuwelijke wijze. Door den stroom van het ruggemerg naar eene zenuw in den elleboog te laten gaan, verkreeg men stuipachtige bewegingen in den benedenarm en in de vingers. Uit deze en andere proeven is het gebleken, dat er geene zamentrekking plaats heeft, dan wanneer de stroom eene zenuw in hare geheele lengte doorloopt, en dat ook de rigting van den stroom daarop invloed uitoefent. De electrische stroom werkt dus op het zenuwstelsel; de aard der werking verschilt echter aanmerkelijk van die van andere prikkels, door dat de electriciteit nog werken kan, wanneer de andere geene uitwerking meer hebben, en dat sommige vergiften, zoo als blaauwzuur, morphine (opium) en andere, die de gevoeligheid van de zenuwen voor gewone prikkels wegnemen, de werking van den electrischen stroom niet kunnen beletten.

Een voorbeeld van de werking van den electrischen stroom op het levend ligchaam hebben wij reeds vermeld, toen wij van de eenvoudige proef gewaagden, om een stuk zink onder en een stuk zilver boven de tong te houden en deze beide metalen met elkander in aanraking te brengen. De metaalachtige smaak, welke men dan bemerkt, moet aan den electrischen stroom worden toegeschreven. Ook bij de andere zintuigen kan men dergelijke werkingen waarnemen. Von Humboldt stak een stuk zink in een der neusgaten en bragt het in aanraking met een zilveren plaatje, dat hij op de tong had geplaatst; hij gevoelde aanstonds koude in de neus en eene prikkeling, even als wanneer men moet niezen; anderen begonnen uit den neus te bloeden, wanneer zij deze proef deden. Volta liet den stroom van 40 elementen zijner kolom van het eene oor naar het andere gaan, en vernam een bijzonder sterk bruischend geluid; anderen bemerkten in dit geval een muzikalen toon. Een zinkplaatje tegen het eene oog en een koperplaatje tegen het andere houdende, en deze met elkander in aanraking brengende, bemerkte von Humboldt een sterk licht.

Laat men den electrischen stroom eener sterkere batterij door een gedeelte van het ligchaam gaan, door de beide electroden in de handen te nemen, dan ondervindt men, op het oogenblik dat de keten gesloten wordt, een schok,

die des te heviger is naarmate het aantal elementen grooter is, wel te verstaan, wanneer de ongelijknamige polen telkens verbonden en dus de spanning en de electromotorische kracht aanzienlijk zijn. Is het aantal elementen zeer groot, dan kan de schok gevaarlijk zijn; in eene verzameling te Londen bevindt zich eene batterij van 2000 elementen, waardoor een paard of een os kan doodgeslagen worden. Een enkel element met groote afmetingen of eene batterij van vele elementen, waarvan de gelijknamige polen onderling verbonden zijn, en waarbij dus ook de electromotorische kracht gering is, geeft geen merkbaren schok.

Men gevoelt den schok het sterkst op het oogenblik dat de keten gesloten wordt; daarna gevoelt men slechts trekkingen in de spieren. Wordt de keten weder geopend, dan gevoelt men op nieuw een schok. Men kan de werking aanzienlijk vermeerderen door den overgang van den stroom van den geleider op de hand gemakkelijker te maken. Te dien einde verbindt men met de pooldraden koperen cilinders, die men in de handen houdt, na deze eerst bevochtigd te hebben met water, waarin men eenig zwavelzuur geschonken heeft.

Wij kunnen omtrent de werking van den electrischen stroom op de verschillende zenuwen in het menschelijk ligchaam hier in geene bijzonderheden treden; om de belangrijke uitkomsten van de proefnemingen van Matteucci en anderen op dit gebied te kunnen begrijpen is eenige physiologische kennis noodig. Wij bepalen ons dus tot de mededeeling, dat de stroom zamentrekkingen, pijnen, vermindering van prikkelbaarheid, afscheiding van vochten en dergelijke verschijnselen kan te weeg brengen. Ook heeft men er gebruik van gemaakt om de levenswerkingen, zooals bij voorbeeld de ademhaling bij personen die gestikt of verdronken waren, weder op te wekken. In enkele gevallen heeft men gunstige uitkomsten verkregen; van daar dat de galvanische stroom somtijds ook door geneeskundigen bij verlammingen met goed gevolg is toegepast.

Ongelukkig heeft de kwakzalverij zich in de laatste jaren ook van den electrischen stroom meester gemaakt, en wordt de aanwending van galvanische electriciteit dikwijls aangeprezen, zonder dat men zich van het al of niet doelmatige heeft overtuigd. De electrische stroom wordt met een geneeskundig doel op twee verschillende wijzen toegepast; òf men laat den lijder achtervolgens talrijke min of meer hevige schokken ondervinden, en in dit geval bedient men zich bij voorkeur van de inductie-toestellen, die wij eerst later zullen leeren kennen; òf men laat den stroom onafgebroken werken, ten einde de prikkelbaarheid der zenuwen te verminderen. In dit laatste geval kan men van de zoogenaamde galvanische

kettingen gebruik maken; alvorens echter daartoe over te gaan, doet men wel zich te overtuigen, of de ketting of zelfs het soort van kettingen, waarvan men zich bedient, zoodanig is zamengesteld, dat er een electrische stroom kan ontstaan, wanneer de beide uiteinden of de geheele ketting met het ligchaam in aanraking worden gebragt. Onder die toch, welke verkocht en aanbevolen worden, komen er voor, bij welke men geen spoor van electrischen stroom kan waarnemen. Die van Pulvermacher schijnen de meest aanbevelenswaardige te zijn.

286. **Warmteverschijnselen, te weeg gebragt door den galvanischen stroom.** — De physische werkingen van den electrischen stroom zijn van onderscheiden aard; daardoor kunnen namelijk warmte ontwikkeld, licht verwekt en magnetische verschijnselen veroorzaakt worden. Wij zullen ons vooreerst alleen met de beide eerstgenoemde bezig houden, om later ook de magnetische te leeren kennen.

Wij hebben hiervóór bij de eerste beschrijving van een galvanisch element (270) reeds opgemerkt, dat wanneer de polen door een geleiddraad verbonden zijn, deze warm wordt en zelfs kan gloeijen of smelten. De warmte, welke in den sluitdraad ontwikkeld wordt, is vooral aanzienlijk, wanneer de afmetingen der elementen groot zijn en er dus eene groote hoeveelheid electriciteit door den draad gaat; van daar dat het boven beschrevene element van Hare (276) zeer geschikt is om eene aanzienlijke hoeveelheid warmte te ontwikkelen. Op eene eenvoudige wijze kan men de warmte-ontwikkeling aantoonen met een daartoe ingerigt element van Wollaston (275), aan welks polen men een paar kleine koperen klemmen heeft bevestigd, waartusschen een dunne platinadraad kan worden vastgemaakt. Dompelt men dit element in verdund zuur, dan gaat de electrische stroom door den platinadraad, die aanstonds begint te gloeijen. Eene krachtige werking kan men verkrijgen met eene Bunsen'sche keten. Met eene batterij van 50 zoodanige elementen kan men gemakkelijk eene niet al te dikke breinaald smelten, zelfs ook een dunnen platinadraad. Despretz (1849) heeft proeven genomen genomen met eene batterij van 600 zoodanige elementen; het gelukte hem met behulp daarvan binnen weinige minuten 250 wigtjes platina te smelten, en zelfs kool zoo week te doen worden, dat hij kon gebogen worden.

Het smelten van metaaldraden door middel van den galvanischen stroom gaat met lichtontwikkeling gepaard; de kleur van het licht hangt echter af van den aard van het metaal. Lood geeft bij de verbranding (men mag hier van verbranding spreken, dewijl het metaal geoxydeerd wordt) eene roode

kleur, zink eene roodachtig witte, tin en goud eene lichtblaauwe, koper en zilver eene groene kleur, terwijl ijzer en platina helder wit licht geven. Platina is het eenige der hier opgenoemde metalen, dat niet geoxydeerd wordt. Het smelten van metaaldraden door middel van eenen sterken galvanischen stroom is een prachtig verschijnsel wegens de talrijke vonken, welke door de afvliegende gesmolten of verbrande deeltjes veroorzaakt worden.

Uit de omstandigheid, dat dunne draden veel gemakkelijker door den galvanischen stroom aan het gloeijen kunnen gebragt worden dan dikke, volgt, dat de wederstand, dien de stroom in den draad ondervindt, een grooten invloed op de verschijnselen uitoefent. In den geheelen draad, waardoor de stroom gaat, wordt warmte opgewekt; hoe naauwer de weg is, dien de stroom volgt, des te meer warmte zal er op die plaats vrij worden. Met de geleidbaarheid is het eveneens gelegen; hoe slechter de draad den stroom geleidt des te gemakkelijker kan hij aan het gloeijen gebragt worden.

De wetten van de warmte-ontwikkeling in den galvanischen keten zijn het eerst ontdekt door Lenz, Joule en Becquerel. Zij lieten den stroom gaan door een koperdraad, dien zij spiraalsgewijze om een glazen buisje gewonden en in een kleinen calorimeter gedompeld hadden. De temperatuur-verhooging van het vocht in den calorimeter, waarvoor zij alcohol gebruikten ten einde de scheikundige werking te verhinderen, stelde hen in staat de hoeveelheid warmte-eenheden te bepalen, die in een bepaalden tijd door den stroom in den draad ontwikkeld werden. Zij vonden, dat de hoeveelheid warmte, in de eenheid van tijd ontwikkeld, evenredig is aan den geleidingswederstand in den draad en aan de tweede magt der stroomsterkte. De lengte van den draad oefent geen invloed op de totale warmte-ontwikkeling uit, en de verwarming is overal in den draad dezelfde, mits hij volmaakt homogeen en overal even dik is. Stelt men dus door W de warmte-ontwikkeling in den draad, door R zijn geleidings-wederstand en door S de stroomsterkte voor, dan is

$$W = RS^2.$$

Men heeft van de gloeijing van metaaldraden door den galvanischen stroom met goed gevolg gebruik gemaakt bij het ontsteken van mijnen. Te dien einde neemt men twee zeer lange en niet al te dunne koperdraden, liefst door gutta-percha geïsoleerd, tusschen wier uiteinden zich daar, waar het te ontsteken buskruid geplaatst is, een dun platinadraadje bevindt, dat goed met beide verbonden is. De andere uiteinden der koperdraden worden met de beide polen eener galvanische batterij in verbinding gebragt; zoodra dit ge-

schiedt, is de keten gesloten; de stroom gaat door den koperdraad en dus ook door het platinadraadje; en daar de stroomsterkte over de geheele geleiding dezelfde moet zijn, zal de warmte-ontwikkeling in den dikken koperdraad, die slechts weinig wederstand biedt, gering, maar daarentegen in den dunnen platinadraad aanzienlijk zijn; deze begint dus te gloeijen en steekt het kruid aan.

Laat men den stroom door eene vloeistof gaan, dan zal ook daarin warmte-ontwikkeling plaats hebben. In dit geval is het echter moeijelijker de verschijnselen duidelijk na te gaan, daar er, zoo als wij later zien zullen, in de vloeistof tevens eene scheikundige werking plaats heeft, waardoor de verschijnselen veel zamengestelder worden.

Wij hebben tot dusverre alleen gewag gemaakt van de warmte-ontwikkeling in den sluitdraad; het is echter niet alleen daarin, dat warmte ontwikkeld wordt; dit geschiedt evenzeer in de cel zelve. Joule heeft ook daaromtrent onderzoekingen in het werk gesteld en bevonden, dat wanneer beide polen zonder sluitdraad met elkander verbonden worden, de warmte-ontwikkeling evenzeer evenredig is aan den geleidings-wederstand in de cel en aan de tweede magt van de stroomsterkte. De boven vermelde wet geldt dus voor de geheele keten, zoowel voor de cel zelve, als voor den sluitdraad.

Men kan uit het voorgaande gemakkelijk afleiden, dat men het geheel in zijne magt heeft om de warmte-ontwikkeling in den sluitdraad te vermeerderen of verminderen. Neemt men namelijk eenen dikken, korten draad, dan zal daarin slechts weinig warmte ontwikkeld worden, maar des te meer in de cel zelve. Draagt men daarentegen zorg, dat de geleiding in de cel zoo goed mogelijk en dus de aldaar ondervonden wederstand gering is, terwijl men een langen en dunnen geleiddraad neemt, dan zal nagenoeg alle warmte in dien draad vrij worden, en in de cel bijna geene warmte-ontwikkeling plaats hebben. Proeven van Favre hebben duidelijk aangetoond, dat hoe grooter de uitwendige tegenstand is, des te minder warmte er in de cel zelve wordt opgewekt.

287. **Verband tusschen de scheikundige werking in de cel en de ontwikkelde warmte; behoud van arbeidsvermogen in den galvanischen stroom.** — Bij de beschouwing van de verschillende bronnen van warmte (233—241) hebben wij doen opmerken, dat warmte niet uit zich zelve kan geboren worden, maar alleen dan ontwikkeld wordt, wanneer er een zekere arbeid, van welken aard ook, volbragt wordt en er dus arbeidsvermogen verloren gaat; voor dat verlorene arbeidsvermogen treedt alsdan warmte in de plaats. De wet, welke wij hebben aangeduid door den

naam van bewaring van kracht (56), of beter gezegd van het behoud van arbeidsvermogen, moet ook voor de warmte-ontwikkeling in de galvanische keten gelden, zal zij op den naam van eene algemeene wet kunnen aanspraak maken; het is dus noodig de tot dusverre behandelde verschijnselen aan haar te toetsen en, zoo zij blijkt ook hier van toepassing te zijn, na te gaan welke belangrijke gevolgen daaruit kunnen worden afgeleid, voor zooverre den oorsprong der galvanische electriciteit aangaat.

De warmte in den sluitdraad wordt voortgebragt door den electrischen stroom of door de beweging der electriciteit; dit leert ons echter nog niets bijzonders, en het is dus noodig nog hooger tot den oorsprong op te klimmen. Die electrische stroom wordt, zooals wij hiervoor hebben doen zien, veroorzaakt door de scheikundige werking in de cel. Wij kunnen dus zeggen, dat in dit geval door scheikundige werking warmte wordt ontwikkeld, en zulks komt volkomen overeen met het hiervóór (240) bij de behandeling der mechanische warmtetheorie opgemerkte; nogtans moet men niet uit het oog verliezen, dat hier de galvanische stroom als 't ware dient als middel om de warmte op eene andere plaats te doen ontstaan en meer op één punt te concentreren. Wordt zink in verdund zwavelzuur opgelost, dan wordt er warmte ontwikkeld, maar deze warmte verspreidt zich aanstonds door de vloeistof, en wordt gedeeltelijk medegenomen door het ontwijkende waterstofgas. In de galvanische keten daarentegen wordt in de cel zelve geen of althans zeer weinig warmte ontwikkeld, maar er ontstaat een stroom, en die stroom verwekt in den metalen sluitdraad warmte. Zelfs heeft men het, zooals wij zagen, in zijne magt om, door aan dien draad de vereischte lengte en dikte te geven, de warmte-ontwikkeling nagenoeg geheel in den sluitdraad te doen plaats hebben, alsook, door in dien draad een dunner gedeelte in te voegen, de ontwikkelde warmte bijna geheel op één punt te concentreren; aan deze wijze om van de door scheikundige werking ontwikkelde warmte gebruik te maken is dus een groot voordeel en gemak verbonden.

Maar zal nu het beginsel van het behoud van arbeidsvermogen in den galvanischen stroom bewaarheid worden, dan moet er ook hier weder eene bepaalde betrekking tusschen de scheikundige werking in de cel en de hoeveelheid warmte, die daarin zoowel als in den draad ontwikkeld wordt, bestaan; dan moet het worden aangetoond, dat van het arbeidsvermogen, dat als scheikundig arbeidsvermogen verdwijnt, nogtans niets verloren gaat, maar dat het geheel als warmte, dus alleen onder een anderen vorm, teruggevonden wordt. Joule, Favre, Bosscha en anderen hebben in den laatsten tijd vele onderzoekingen in het werk gesteld, die tot de overtuiging hebben geleid, dat

zulks inderdaad het geval is, en dat de warmte, die men in den draad en in de cel waarneemt, volkomen overeenkomt met die, welke men zoude hebben waargenomen, wanneer de electrische stroom niet als middel had gediend om de warmte-ontwikkeling te doen plaats hebben in een ander punt dan dat, waar de scheikundige werking plaats vindt.

Favre (1853) plaatste namelijk een klein bepaaldelijk voor dit doel ingerigt element, uit platina en geamalgameerd zink zamengesteld, geheel in een calorimeter. Zoowel wanneer de keten gesloten werd door een korten draad, waarin de wederstand zeer gering was, als wanneer tot de sluiting lange draden van onderscheidene dikte gebruikt werden, vond hij voor de warmte, die zoowel in de cel zelve als in den sluitdraad ontwikkeld werd, juist die welke, onafhankelijk van de opgewekte electriciteit, door de verschillende scheikundige werkingen in de keten moest ontwikkeld worden.

Hieruit blijkt dus, dat het beginsel van het behoud van arbeidsvermogen in den galvanischen stroom evenzeer geldt, als wij zulks hiervóór hebben aangetoond voor de andere warmtebronnen. Van dit beginsel uitgaande, hebben Joule (1843), Favre (1857) en Bosscha (1857) hunne proefnemingen zoodanig ingerigt, dat de electrische stroom niet alleen warmte, maar tevens een arbeidsvermogen voortbragt. Van welken aard dit gewonnen arbeidsvermogen was, en hoe de stroom dit kon voortbrengen, kunnen wij hier niet verklaren, daar wij de werking van den stroom, waardoor zoodanige arbeid verrigt kan worden, eerst later zullen leeren kennen; men zal nogtans inzien, dat volgens het algemeene beginsel het scheikundig arbeidsvermogen, dat in de galvanische keten verloren gaat, gelijk moet zijn aan de voortgebragte warmte, vermeerderd met het gewonnen arbeidsvermogen, en dat men dus hieruit de betrekking tusschen de eenheid van warmte en de eenheid van arbeidsvermogen, dat is het warmte-aequivalent, kan berekenen. De uitkomst dier berekeningen komt zeer goed overeen met de waarde 425, die boven (239) voor dat aequivalent is opgegeven; uit de waarnemingen van Joule vindt men namelijk daarvoor 442,2, uit die van Favre 443,0 en uit die van Bosscha 432,1 en 419,5.

Omgekeerd kan men ook van deze wet gebruik maken om de warmtehoeveelheid te bepalen, die bij scheikundige werking vrij wordt. Bepaalt men namelijk de hoeveelheid warmte, die in de cel en in den draad ontwikkeld wordt, en rigt men de proef zoodanig in, dat die warmte-ontwikkeling geheel in den draad plaats vindt, dan zal deze tevens de warmte aanduiden, die ten gevolge der scheikundige verbinding is vrij geworden.

Beschouwt men het beginsel van het behoud van arbeidsvermogen in ver-

band met de wet van Ohm, volgens welke de stroomsterkte wordt aangeduid door $S = \frac{E}{R}$, en met die van Joule, volgens welke de hoeveelheid ontwikkelde warmte wordt uitgedrukt door de formule $W = RS^2$, dan kan men ook door redenering gemakkelijk het verband tusschen deze drie wetten aantoonen. Volgens de wet van Ohm is namelijk $RS = E$; substitueert men dit in de formule van Joule, dan verkrijgt men $W = ES$; dat is, de warmte-ontwikkeling moet evenredig zijn aan de electromotorische kracht en aan de stroomsterkte. Gaan wij na, in hoeverre deze formule is overeen te brengen met de wet van het behoud van arbeidsvermogen.

Stellen wij in de eerste plaats dat, terwijl de electromotorische kracht onveranderd blijft, de sterkte van den stroom toeneemt, bijv. tweemaal grooter wordt; in dat geval zal de hoeveelheid electriciteit, die in de eenheid van tijd door eenig gedeelte van den draad gaat, ook tweemaal grooter zijn; hetzelfde zal het geval moeten zijn met de hoeveelheid zink, die in denzelfden tijd in de cel geoxydeerd wordt, dewijl deze aan de stroomsterkte evenredig moet zijn. Door die oxydatie is dus ook eene dubbele hoeveelheid warmte vrij geworden. Men ziet dus, dat de warmte-ontwikkeling toeneemt in dezelfde verhouding als de stroomsterkte, en dat, zoo er tweemaal meer scheikundig arbeidsvermogen is verloren gegaan, er ook tweemaal meer warmte gewonnen wordt, hetgeen geheel met het beginsel van het behoud van arbeidsvermogen overeenkomt.

Nemen wij in de tweede plaats aan, dat de sterkte van den stroom dezelfde blijft, doch dat men de electromotorische kracht E laat toenemen, hetzij door het getal der cellen te vermeerderen, hetzij door een ander soort van cellen te nemen. Stelt men in het eerste geval, dat er *n* cellen met de ongelijknamige polen onderling verbonden zijn, dan zal de electromotorische kracht *n*-maal grooter geworden zijn. Maar er wordt in die *n* cellen *n*-maal meer zink geoxydeerd; de scheikundige werking is dus *n*-maal grooter en er gaat dus *n*-maal meer scheikundig arbeidsvermogen verloren. Volgens het beginsel van het behoud van arbeidsvermogen moet er dus ook *n*-maal meer warmte voor in de plaats komen; hieruit volgt dus, dat in dit geval de warmte-ontwikkeling evenredig moet zijn aan de electromotorische kracht. Neemt men in het tweede geval eene cel, waarin de electromotorische kracht geringer is, door bijv. in een zink-platina element het zink door ijzer te vervangen, dan zal, wanneer de stroomsterkte dezelfde blijft, de scheikundige werking minder zijn, omdat ijzer minder verwantschap tot zuurstof heeft dan zink. Er gaat dus minder scheikundig arbeidsvermogen verloren en er moet

dus volgens de wet van het behoud van arbeidsvermogen ook minder warmte daarvoor in de plaats komen.

Uit dit een en ander volgt dus duidelijk, dat de formule W = ES volkomen overeenstemt met de wet van het behoud van arbeidsvermogen. Daar W de gewonnen warmte in de keten is, zoo moet dus het product ES het verloren scheikundig arbeidsvermogen in de cel voorstellen (1).

288. **Het behoud van arbeidsvermogen in den galvanischen stroom in verband met de contact-theorie.** — De wet van het behoud van arbeidsvermogen bestaat, zooals reeds meermalen is opgemerkt, daarin, dat er niet alleen geen arbeidsvermogen verloren gaat, maar dat er evenmin arbeidsvermogen van welken aard ook kan worden daargesteld, tenzij er tevens eene gelijke hoeveelheid van denzelfden of van eenen anderen aard verloren gaat.

Wij hebben bij onze beschouwing van de warmte-ontwikkeling in den galvanischen stroom in de gelijkheid van het verloren scheikundig arbeidsvermogen en van de hoeveelheid gewonnen warmte daarvan de bevestiging gevonden. Geheel anders zal het echter met de zaak gelegen zijn, wanneer men den oorsprong van den stroom niet langer zoekt in de scheikundige werking, maar alleen, zoo als door Volta en anderen is geschied en nog door velen wordt aangenomen, in eene aanraking van metalen onderling of van metalen met vloeistoffen (272). Bij enkele aanraking toch heeft er geene krachtsinspanning plaats, en zonder deze blijft ook de aanraking steeds dezelfde; wordt dus door contact een electrische stroom opgewekt, die op zijne beurt wederom tot warmte-ontwikkeling aanleiding geeft, dan is er warmte, dus arbeidsvermogen, gewonnen zonder eenig daarmede overeenkomend verlies, zonder dat er arbeidsvermogen van welken aard ook is verbruikt; die warmte zoude dus, om zoo te zeggen, voor niet verkregen zijn; men zoude op die wijze hetzelfde hebben verkregen, wat zij bedoelen, die naar de zoogenaamde eeuwigdurende beweging zoeken (56). Dit is met het beginsel van het behoud van arbeidsvermogen niet overeen te brengen; evenmin als de stof uit niets kan worden voortgebragt, evenmin kan men kracht of arbeidsvermogen scheppen. Eene theorie, volgens welke zoodanige voortbrenging moet plaats hebben, kan dus niet worden aangenomen. Welke

(1) Uit het bovenstaande kan men tot het belangrijk besluit geraken, dat, zoo de wet van het behoud van arbeidsvermogen geldt voor den galvanischen stroom, de volgorde der metalen steeds dezelfde moet zijn, wanneer zij worden gerangschikt: 1o. volgens hunne electromotorische kracht; 2o. volgens hunne scheikundige verwantschap tot zuurstof; 3o. naar de hoeveelheden warmte, door de oxydatie vrij geworden.

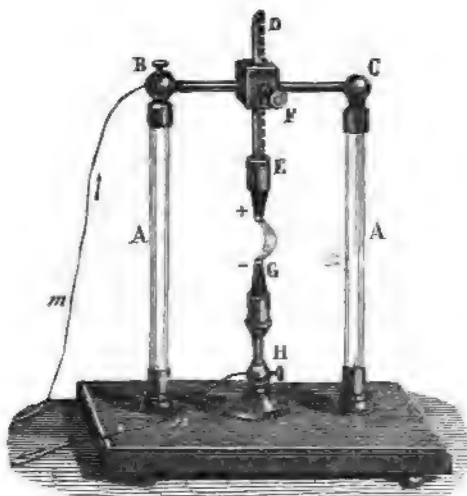
proeven men ook moge aanvoeren om te bewijzen, dat een galvanische stroom enkel door aanraking van twee metalen of van een metaal en een vocht kan ontstaan, voor hem, die doordrongen is van de waarheid van de wet van het behoud van arbeidsvermogen, kunnen zij geene waarde hebben; hij zal steeds overtuigd zijn, dat die aanraking op zich zelve niet als de oorzaak der electriciteits-ontwikkeling kan beschouwd worden, maar alleen de scheikundige werking, welke daarmede gepaard gaat.

289. **Lichtverschijnselen, te weeg gebragt door den galvanischen stroom.** — Wij hebben bij de verklaring van den electrischen stroom reeds opmerkzaam gemaakt op de vonken, die men waarneemt, als men de beide electroden bij elkander brengt. Bij eene zwakke batterij zijn die ter naauwernood merkbaar, maar bij eene sterke kunnen zij de prachtigste verschijnselen opleveren. Terwijl bij eene zwakke galvanische batterij de pooldraden met elkander moeten in aanraking gebragt worden om vonken te verkrijgen, zoo vertoonen zij zich bij eene batterij van 10 Bunsen'sche elementen reeds, wanneer de pooldraden op eenigen afstand van elkander worden gebragt; die afstand is echter altijd veel geringer dan die, op welken de vonken der wrijvings-electriciteit overspringen. Daar bij den galvanischen stroom de aanvoer der tegenovergestelde electriciteiten door de pooldraden onophoudelijk plaats heeft, zoo volgen de vonken elkander daarbij ook nagenoeg onafgebroken op. Zeer duidelijk worden zij, als men aan den eenen pooldraad een ruw metalen voorwerp, bijv. eene vijl vastmaakt, en daarover met den anderen draad heen en weder strijkt. Door de gedurige afbreking en sluiting van de keten ontstaan dan eene menigte vonken, die een schitterend licht geven. Bijzonder schoon is het licht, dat men door de volgende proef verkrijgt. Een bakje met kwikzilver wordt met de eene pool eener sterke batterij verbonden, terwijl men aan de andere een ijzerdraad bevestigt. Brengt men dezen in aanraking met het kwikzilver, dan worden aan alle kanten straalsgewijze prachtige vonken afgeworpen. Dit verschijnsel wordt echter niet alleen door de electrische vonken, maar ook door het verbranden van het ijzer veroorzaakt.

Het sterkste electrisch licht kan men echter verkrijgen door met de beide polen stukken houtskool, of nog liever stukken kool of coke, zooals die zich tegen de wanden der retorten in de gasfabrieken vastzet, te verbinden en deze bij elkander te brengen. Op eene eenvoudige wijze kan zulks geschieden met behulp van den in fig. 262 afgebeelden toestel, welke bestaat uit eene op twee glazen staven A rustende koperen staaf BC, die door middel van den

draad *m* met de positieve pool van de batterij verbonden wordt; aan deze staaf bevindt zich eene getande staaf DE, die door middel van het schroefje F kan worden op en neêr bewogen. In die staaf wordt bij E een puntig stukje houtskool of coke gestoken; eveneens is een stukje coke G in de koperen staaf H gestoken, die door den draad *n* met de negatieve pool der batterij verbonden is. Brengt men nu de beide koolspitsen door middel van F met elkander in aanraking, en sluit men dan de keten, dan wordt er in het aanrakingspunt der koolspitsen een schitterend licht waargenomen, dat nog in glans toeneemt en den in de figuur aangewezen vorm aanneemt, wanneer de koolspitsen op eenigen afstand van elkander worden gesteld. Aan dit licht geeft men den naam van *galvanischen* of *Voltaschen lichtboog*.

Fig. 262.



De afstand, tot welken de beide koolspitsen van elkander kunnen verwijderd worden, zonder dat het lichtverschijnsel ophoudt, is zeer verschillend; is de kool vaster en digter, dan moet de afstand kleiner zijn. Hij groeit daarentegen aan met de electromotorische kracht en dus ook met het getal der cellen. Gebruikt men 10 elementen van Bunsen, dan is het licht schoon; neemt men er ongeveer 40, dan verkrijgt men een licht, dat veel sterker is dan het hiervóór (27) vermelde Drummond'sche licht; men kan het aan de oogen bijna niet verdragen, en doet voorzigtig zich van een bril met blaauwe of groene glazen te voorzien. Het buitengewoon sterk licht wordt niet veroorzaakt door den lichtboog tusschen de koolspitsen, maar door het wit gloeijen dier spitsen zelven. Heeft het eenige oogenblikken geduurd, dan neemt het af; de positieve pool is dan eenigzins stomp geworden, zoodat de afstand is toegenomen. De negatieve daarentegen blijft onveranderd, behalve dat blijkbaar deeltjes kool van de positieve tot de negatieve pool worden overgevoerd. Aan laatstgenoemde is de licht-ontwikkeling sterker, terwijl daarentegen aan

de positieve pool meer warmte ontwikkeld wordt. De verschijnselen hebben evenzeer in het luchtledige als in de lucht plaats, zoodat hier aan geene eigenlijke verbranding kan gedacht worden.

Despretz (1850) heeft proeven in het werk gesteld aangaande de lengte van den lichtboog met eene batterij van 600 Bunsen'sche elementen. Hij vond, dat bij vermeerdering van het aantal de afstand van de koolspitsen grooter kan genomen worden, doch dat de wijze van verbinding der cellen grooten invloed daarop uitoefent. Door 600 elementen zoodanig te verbinden, dat zij eigenlijk 24 elementen vormden, waarvan de electromotoren elk eene 25-maal grootere oppervlakte hadden, verkreeg hij voor den lichtboog eene lengte van 11,5 streep; 6 reeksen, elke van 100 elementen, gaven er eenen van ruim 4 duim; door alle 600 elementen achter elkander te plaatsen, in welk geval de electromotorische kracht dus evenveel-maal grooter was dan bij één element, verkreeg hij slechts een lichtboog van 27,6 streep.

Omtrent de sterkte van het licht, op deze wijze door den galvanischen stroom teweeg gebragt, zijn proeven in het werk gesteld door Casselmann (1843). Deze gebruikte eene batterij van Bunsen van 44 elementen, en bevond dat het licht, door de koolspitsen op eenen afstand van eene halve streep ontwikkeld, gelijk was aan dat van 932 waskaarsen; op eenen afstand van $4\frac{1}{2}$ streep was de lichtsterkte echter slechts 139. Was de kool eerst doortrokken met eene oplossing van salpeterzure strontiaan, van kali of van chloortin, en daarna op nieuw uitgegloeid, dan was de lichtsterkte geringer; eene oplossing van borax in zwavelzuur deed daarentegen de lichtsterkte tot 1171 klimmen. Fizeau en Foucault (1844) vonden, dat het electrische licht bij eene slechts weinig sterkere Bunsen'sche batterij 34-maal sterker was dan dat van het Drummond'sche licht.

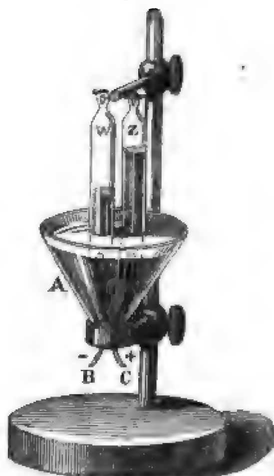
De temperatuur in den Voltaschen lichtboog is de hoogste, die men tot dusverre heeft kunnen verkrijgen; ijzer en staal verbranden daarin met een schitterend licht. Het is Despretz gelukt in dien lichtboog kool week te doen worden en eene menigte stoffen te smelten en te doen vervlugtigen, welke men tot dusverre niet dan in den vasten toestand kende.

Men zal inzien dat de toestel, waarin men de koolspitsen plaatst, niet noodzakelijk van den in fig. 262 afgebeelden vorm behoeft te zijn; men heeft er dan ook verschillende anderen zamengesteld, die even goed aan het doel beantwoorden. In de laatste jaren heeft men echter getracht het electrische licht ook tot verlichting van pleinen of straten aan te wenden; in dit geval plaatst men veelal de lichtgevende koolspitsen in het brandpunt van eenen hollen spiegel, waardoor het licht dan in de verlangde rigting wordt terugge-

kaatst. Bij deze aanwending van het electrisch licht is het echter noodig, dat het onafgebroken dezelfde sterkte behoudt, en steeds op dezelfde plaats blijft. Wij hebben reeds opgemerkt, dat dit ten gevolge van het langzame verteren der koolspitsen niet kan plaats hebben; wel is die vertering minder, naarmate men hardere kool gebruikt, maar zelfs bij die, welke uit den zich in de gasretorten vastzettenden coke gesneden worden, vermindert na eenigen tijd de helderheid ten gevolge van den grooteren afstand. Om hierin te voorzien heeft men toestellen uitgedacht, waardoor de koolspitsen van zelf digter naar elkander toegebragt worden, naarmate die aan de positieve pool afneemt. Hoewel de toestellen door Crahay, Stöhrer, Deleuil en vooral ook die van Duboscq zeer goed aan dit doel beantwoorden, zullen wij echter de beschrijving daarvan hier achterwege laten, vooral ook omdat men hunne werking niet volkomen kan begrijpen zonder de kennis van natuurkundige eigenschappen, die eerst later kunnen verklaard worden.

290. **Scheikundige werking van den galvanischen stroom; ontleding van water; voltameter.** — Terwijl de scheikundige werking in de galvanische cel aanleiding geeft tot een electrischen stroom, kan omgekeerd door dien stroom scheikundige werking en wel bepaald eene ontleding worden volbragt.

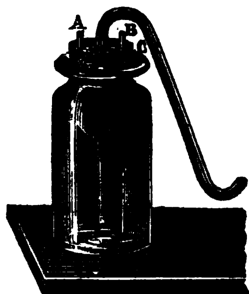
Fig. 263.



De eerste stof, welke men door den electrischen stroom ontleed heeft, was het water; dit geschiedde in 1810 door Carlisle en Nicholson met behulp van eene Volta'sche kolom, zamengesteld uit zilveren en zinken platen. Op de bovenste zinkplaat bragten zij eenige druppels water en dompelden daarin den pooldraad, aan het onderste plaatje verbonden; terstond werd er in die vloeistof eene duidelijke gasontwikkeling zigtbaar, veroorzaakt door de ontleding van het water in zuurstof en waterstof. Het duidelijkst kan men de ontleding aantoonen met den in fig. 263 afgebeelden toestel, den hiervóór reeds meermalen genoemden *voltameter*. Deze bestaat uit een glazen beker A, waarvan de glazen bodem vervangen is door eenen isolerenden bodem van hars of lak, waardoor men twee koperdraden B en C gestoken heeft,

daarbij zorgdragende, dat zij elkander niet aanraken. Aan die koperdraden zijn bij D en E twee platinaplaatjes gesoldeerd; het glas wordt daarna zoo ver met gesmolten lak of hars gevuld, dat het koper geheel daarmede bedekt is, en dus alleen het platina daarboven uitsteekt. Het wordt vervolgens met water volgeschonken, en daarin worden twee omgekeerde eveneens met water gevulde glazen buisjes of klokjes opgehangen op zoodanige wijze, dat in elk een der platinaplaatjes komt. Worden nu de draden B en C met de pooldraden eener galvanische batterij verbonden, bijv. B met den negatieven en C met den positieven, dan bemerkt men terstond aan de oppervlakte van beide eene gasontwikkeling, die des te sterker zijn zal naarmate de beide plaatjes minder van elkander verwijderd zijn, en vooral zeer bevorderd wordt, wanneer men eenige druppels zuur bij het water gevoegd heeft, ten einde het tot een beteren geleider voor den electrischen stroom te maken. Heeft de gasontwikkeling eenigen tijd geduurd, dan merkt men duidelijk, dat het volume van het gas, dat zich aan de negatieve pool D ontwikkeld heeft, tweemaal grooter is dan dat aan de positieve pool. Bij onderzoek blijkt het eerste waterstof, het laatste zuurstof te zijn, hetgeen geheel overeenkomt met de vroeger (27) reeds gemaakte opmerking dat water bestaat uit één aequivalent waterstof en één aequivalent zuurstof, of uit één volume zuurstof en twee volumen waterstof. Bevinden zich de beide platen in eene zelfde flesch, zooals in fig. 264, waar A en B de beide koperdraden zijn, die met de polen der galvanische batterij verbonden worden, dan zal men de beide gassen vermengd, dus als knalgas, door middel van eene door de kurk C gestokene omgebogene glazen buis kunnen opvangen. Men maakt gebruik van platinaplaatjes, omdat de zuurstof zich met dit metaal niet verbindt, en dus den gasvormigen toestand behoudt; neemt men koper, dan verbindt zij zich met dit tot koperoxyd.

Fig. 264.



De werking laat zich gemakkelijk verklaren. De stroom gaat van de positieve pool of electrode naar de andere door de vloeistof heen, en bewerkt aldaar eene ontleding, even als wij hiervóór (273) bij de vloeistof in de cel zelve hebben waargenomen; de waterdeeltjes namelijk schijnen alle tengevolge van den stroom een bepaalden, zoogenaamd polairen stand aan te nemen, zoodat zij alle hunne waterstof naar den eenen, hunne zuurstof naar den anderen kant gekeerd hebben; twee naast elkander lig

gende waterdeeltjes hebben dus steeds de tegenovergestelde deelen naar elkander gekeerd. Het waterdeeltje, dat het digst bij de positieve pool is, wordt ontleed in zuurstof en waterstof; terwijl het zuurstofgas ontwijkt, verbindt zich de waterstof met de zuurstof van het eveneens ontlede naastgelegene waterdeeltje, en zoo verder tot aan de negatieve pool toe, alwaar de waterstof van het laatste waterdeeltje in den gasvormigen toestand ontwijkt.

291. **Ontleding van oxyden, zuren en zouten.** — Nadat de ontleding van het water door den electrischen stroom was geschied, vestigde men ook weldra de aandacht op andere scheikundige verbindingen. In 1806 begon Davy zijne belangrijke onderzoekingen op dit gebied, waarmede zich sedert vele natuurkundigen, vooral ook Faraday, hebben bezig gehouden.

Eene belangrijke ontleding was die van het kali. Vóór dien tijd had men deze stof niet kunnen ontleden, en hield haar dientengevolge voor eene grondstof. Davy echter ontleedde haar door middel van den galvanischen stroom in zuurstof en kalium-metaal, en wees daardoor aan het kali zijne plaats onder de metaal-oxyden aan. De proef laat zich gemakkelijk herhalen, door tusschen de polen van eene vrij sterke batterij een stukje vochtige kali te brengen; aan de positieve pool scheidt zich dan de zuurstof af, terwijl zich aan de negatieve pool kleine glanzende metaalbolletjes van kalium vertoonen, die echter, wegens de groote verwantschap van dit metaal tot zuurstof, aan de lucht terstond geoxydeerd worden. Op gelijke wijze kan men uit de soda het sodium, uit de kalk het calcium en uit eene menigte andere oxyden de overeenkomstige metalen afscheiden; de zuurstof vertoont zich altijd aan de positieve pool, het metaal aan de negatieve. Sommige metaal-oxyden, zooals koperoxyd, zinkoxyd, zilveroxyd en andere, die in den droogen toestand zeer slechte geleiders van den electrischen stroom zijn, kunnen niet ontleed worden in den vasten toestand; men moet ze dus òf door smelten vloeibaar maken, waardoor zij veelal goede geleiders worden, òf in de eene of andere vloeistof oplossen, zooals bijv. zilveroxyd in ammonia.

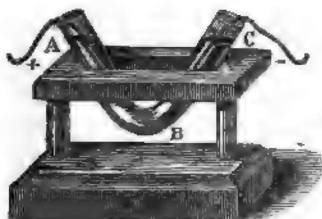
Zuren, zooals zwavelzuur en phosphorzuur, worden eveneens door den galvanischen stroom ontleed; de zuurstof vertoont zich aan de positieve pool, de zwavel of de phosphorus aan de negatieve.

Wanneer chloorverbindingen en zwavelmetalen door den stroom ontleed worden, dan begeeft zich het chloor of de zwavel naar de positieve pool, het metaal naar de negatieve. De ontleding van deze stoffen geschiedt doorgaans veel gemakkelijker dan die van de oxyden. Chloorzilver bijv. kan zeer gemakkelijk in chloor en metalliek zilver gescheiden worden, door het in een klein porse-

lein potje boven eene spiritus-lamp te smelten, en in de gesmoltene vloeistof de beide platina-electroden te dompelen, zonder ze met elkander in aanraking te brengen. Calcium, magnesium, aluminium en dergelijke metalen worden veel gemakkelijker uit de chloorverbindingen dan uit de oxyden afgescheiden.

Bij zouten, gevormd door de verbinding eener basis met een zuur, brengt de galvanische stroom eveneens eene scheikundige ontleding te weeg; het zuur begeeft zich naar de positieve pool, te gelijk met de zuurstof van de basis; het metaal der basis wordt aan de negatieve pool afgescheiden. Heeft men bijv. een koperzout of een zilverzout, dan vindt men aan de negatieve pool een aanslag van koper of zilver. Is echter het metaal van dien aard, dat het in staat is het water te ontleden, zooals kalium, dan is de werking eenigzins anders. Men moet het er dan voor houden, dat door het kalium-metaal, aan de negatieve pool afgescheiden, het water ontleed wordt, zoodat aldaar kalium-oxyd of kali gevormd wordt, terwijl het door de waterontleding vrij geworden waterstofgas aan die zelfde pool ontwijkt. De uitkomst is dan dezelfde, alsof het zuur aan de positieve en de basis aan de negatieve pool was afgescheiden. Door eene eenvoudige proef kan men dit gemakkelijk aantoonen. In eene omgebogen glazen buis ABC, zooals in fig. 265 is afgebeeld, schenkt men eene oplossing van een neutraal zout, bijv. van zwavelzure kali, waaraan men door bijvoeging van een paar druppels violenstroop eene blaauwe kleur gegeven heeft. In de beide beenen der buis brengt men de platina-electroden eener batterij van 4 of 5 Bunsen'sche elementen, bijv. bij A de positieve, bij B de negatieve. Heeft de werking van den stroom eenige oogenblikken geduurd, dan bevindt men, dat in het gedeelte AB de kleur van het vocht rood, in BC daarentegen groen is geworden. Daar nu de kleur van het plantensap rood wordt door de werking van een zuur, doch groen door die eener alkalische basis, zoo blijkt hieruit, dat er eene ontleding van het zout heeft plaats gehad, en dat het zuur zich aan de positieve, de basis zich aan de negatieve pool heeft afgezet.

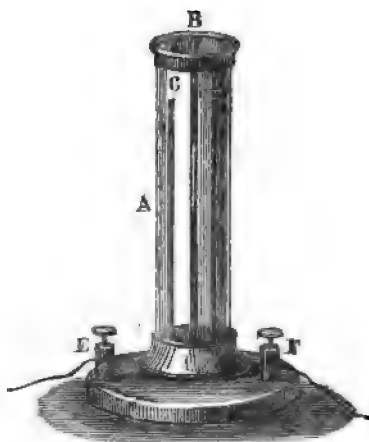
Fig. 265.



Men kan deze proef ook nog anders inrigten met behulp van den in fig. 266 afgebeelden en door Logeman (1857) uitgedachten toestel. Deze bestaat uit een glazen cilinder A, dien men door middel van een poreus middelschot B in twee deelen verdeeld heeft. De beide electroden C en D komen ter

weêrszijden van dit middelschot uit, en worden door middel van de klemschroefjes E en F met de pooldraden van eene kleine galvanische batterij van twee Bunsen'sche of Grove'sche elementen verbonden. Heeft men nu de met violenstroop gekleurde oplossing in het glas geschonken, dan vertoont zich, wanneer de keten gesloten is, weldra aan de positieve electrode eene roode en aan de negatieve eene groene kleur. Het verschijnsel is hier duidelijker, daar de twee vochten zich minder met elkander vermengen; bovendien heeft men een minder sterken stroom noodig, daar men de electroden in fig. 266 veel digter bij elkander kan plaatsen dan in fig. 265.

Fig. 266.



Mist men deze beide toestellen, dan kan men zich ook op de volgende wijs van deze eigenschap overtuigen. Men plaatst drie glaasjes, die men met bovengemelde blaauw gekleurde oplossing gevuld heeft, naast elkander en brengt die door middel van bevochtigde katoenen draden met elkander in gemeenschap; dompelt men nu de beide electroden in de twee uiterste glaasjes, dan verandert in deze beiden de kleur, terwijl die in het middelste blaauw blijft.

Bij de ontleding van zouten neemt men dikwijls ook eene gasontwikkeling aan de electroden waar; dit moet worden toegeschreven aan eene water-ontleding, welke te gelijk met die van het zout zelf plaats heeft. Deze is dan echter niet te beschouwen, zooals bij de ontleding van een zout met alkalische basis, als eene ontleding van het water door het alkali-metaal, maar als eene water-ontleding door den stroom zelven.

De ontleding van zamengestelde stoffen is door Faraday *electrolyse* genaamd; de stof, welke ontleed wordt, noemt hij de *electrolyte*. Deze benamingen zijn sedert vrij algemeen in gebruik gekomen.

292. **Wetten van de scheikundige ontleding door den galvanischen stroom.** — De wetten, volgens welke de scheikundige ontleding door den galvanischen stroom plaats heeft, zijn met veel zorg onderzocht door Faraday (1843), en door latere onderzoekingen van Matteucci, Daniell en E. Becquerel (1844) bevestigd. Zij kunnen aldus worden uitgedrukt:

1°. De ontledende werking van een stroom is in al zijne deelen dezelfde.

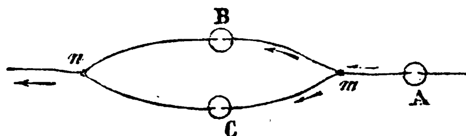
2°. De hoeveelheid der ontlede stof is evenredig aan de hoeveelheid electriciteit, die in een bepaalden tijd daardoor gaat.

3°. Gaat een zelfde stroom achtervolgens door verschillende stoffen, dan verhouden zich de gewigten der afgescheidene grondstoffen als hare scheikundige aequivalenten.

4°. De scheikundige werking in de cel zelve komt overeen met de scheikundige werking, in eenig punt van het uitwendig gedeelte van de keten voortgebragt.

Zonder in vele bijzonderheden te treden aangaande de proefnemingen waardoor Faraday tot deze wetten is geleid geworden, zullen wij toch het een en ander tot opheldering hierbij voegen. Van de juistheid van de eerste kan men zich gemakkelijk overtuigen, door in eene zelfde keten twee of meer voltameters te plaatsen; na verloop van eenigen tijd zal men bevinden, dat in allen evenveel water is ontleed. De tweede wet kan men aantoonen, door den stroom, nadat hij door eenen voltameter is gegaan, door middel van twee aan denzelfden pooldraad bevestigde koperdraden in twee stroomen te verdeelen, die elk weder door eenen voltameter gaan, welke volkomen aan den eersten gelijk is, en de beide draden daarna weder te vereenigen. Fig. 267 kan hiervan een denkbeeld geven; A stelt aldaar eenen voltameter voor; bij *m* splitst zich de stroom in twee stroomen, van welke de een door den voltameter B, de andere door den voltameter C gaat; bij *n* vereenigen zich de beide stroomen weder. Met zoodanigen toestel vond Matteucci, dat de som der hoeveelheden gas, in B en C ontwikkeld, even groot was als die in A. Hieruit volgt dus blijkbaar, dat de hoeveelheid der stof, welke door den stroom ontleed wordt, evenredig moet zijn aan de hoeveelheid electriciteit, die in een zekeren tijd er door gaat; zij moet dus ook evenredig zijn aan de sterkte van den stroom. Door proeven van Pouillet is dit ook volkomen bevestigd. Hieruit volgt dus dat, zooals wij reeds hebben opgemerkt (271), de voltameter een geschikt werktuig is om de sterkte van eenen stroom te meten, en dat ook teregt als eenheid kan aangenomen worden een stroom, die in eene minuut in den voltameter een kubieke duim gas levert.

Fig. 267.



De derde wet, meer bepaaldelijk onder den naam van wet van Faraday bekend, kan gemakkelijk worden aangetoond, door een zelfden stroom te doen

gaan door verschillende oplossingen van zouten, die naast elkander en gelijktijdig in de keten geplaatst zijn. Zijn bijv. A, B en C (Fig. 268) glazen bakjes, waarin zich verschillende oplossingen bevinden, bijv. van een koperzout, een zilverzout en een loodzout, en plaatst men daarin platinaplaatjes, door koperdraden verbonden; neemt men voorts in dezelfde keten nog den voltameter D op; dan zal, zoodra de keten gesloten wordt, in A koper, in B zilver, in C lood worden afgescheiden en in D gas worden ontwikkeld. Onderzoekt men dan, nadat de werking eenigen tijd geduurd heeft, de hoeveelheden dier metalen, alsmede van het in den voltameter aanwezige waterstofgas en zuurstofgas, dan zal men bevinden, dat al deze hoeveelheden tot elkander in reden staan als de scheikundige aequivalent-getallen dier stoffen.

Fig. 268.



Wat eindelijk de vierde wet aangaat, deze is alleen dan als juist aan te merken, wanneer er geene zoogenaamde locale werking (276) plaats heeft, en de scheikundige werking dus ophoudt, zoodra de keten geopend is. Beschouwt men deze eigenschap in verband met hetgeen hiervoor (287) gezegd is omtrent de betrekking tusschen de scheikundige werking in de cel en de warmteontwikkeling in de keten, dan komt men tot het besluit, dat krachtens het beginsel van het behoud van arbeidsvermogen het scheikundig arbeidsvermogen, dat in de cel zelve is verloren gegaan, gelijk moet wezen aan de som van de gewonnen warmte en van het scheikundig arbeidsvermogen, dat in den voltameter door de ontleding van het water gewonnen is.

293. **Polarisatie der electroden; secundaire stroom.** — Toen wij op de verzwakking van de werking van eene galvanische keten hebben opmerkzaam gemaakt (278), hebben wij als eene der redenen daarvan de stroomen aangewezen, die in eene rigting, tegenovergesteld aan die van den hoofdstroom, ontstaan en dien aanmerkelijk verzwakken. Wij kunnen thans, na de scheikundige werking in de galvanische keten meer van nabij beschouwd te hebben, ook aangaande die zoogenaamde secundaire stroomen eenige meerdere bijzonderheden mededeelen.

Wanneer men een stroom laat gaan door eene zout-oplossing, waarin men te dien einde de beide platina-electroden heeft gedompeld, dan zal zich krachtens het hiervóór opgemerkte aan de positieve pool het zuur, aan de negatieve de basis afscheiden. Door de werking van de oplossing zelve op deze

zal er dan een stroom ontstaan in de rigting van de basis naar het zuur, dus tegengesteld aan die van den stroom zelven, waardoor de ontleding plaats had. Men kan zich daarvan overtuigen, wanneer men de gemeenschap van de pooldraden, waaraan de platinaplaatjes verbonden zijn, met de cel doet ophouden, en ze onmiddellijk met eenen gevoeligen galvanometer in verbinding brengt. Hetzelfde kan men verkrijgen, wanneer men een der beide plaatjes in een zuur en het andere in de oplossing eener basis dompelt, en ze vervolgens, na ze met een galvanometer verbonden te hebben, in eene geleidende vloeistof dompelt.

De la Rive had reeds in 1826 waargenomen, dat hetzelfde plaats had, wanneer men in plaats van eene zoutoplossing slechts water met eenige druppels zuur tot electrolyte gebruikte. Later (1844) heeft Matteucci proefondervindelijk aangetoond, dat de stroom, die alsdan in tegenovergestelde rigting wordt waargenomen, alleen moet worden toegeschreven aan de zuurstof en de waterstof, die zich als eene dunne laag aan de oppervlakte van het platina hebben nedergezet of gecondenseerd, en dat dus in dat geval, even als in het zoo even vermelde, de electroden, zooals men het noemt, *gepolariseerd* waren. Zijne proef bestond eenvoudig daarin, dat hij de twee platina-electroden, na gedurende eenigen tijd de eene in eene flesch met zuurstofgas, de andere in eene flesch met waterstofgas gehouden, en ze vervolgens met den galvanometer verbonden te hebben, in het water dompelde, waarin alsdan een stroom ontstond van het plaatje, dat in de waterstof gedompeld was geweest, naar dat, hetwelk in de zuurstof was gehouden. Door het verblijf in het gas had zich een gedeelte daarvan op de oppervlakte van het platina gecondenseerd.

De werking van eenen zoodanigen secundairen stroom is slechts van korten duur, daar de sterkte afneemt, naarmate het gas van de oppervlakte der electroden verdwijnt. Heeft hetzelfde echter plaats in eene galvanische keten, waar onophoudelijk een nieuwe voorraad van gas aan de oppervlakte der electroden wordt ontwikkeld, dan blijft de nadeelige werking van den secundairen stroom ook voortduren.

294. **Passiviteit van het ijzer.** — Bedient men zich van een ijzerdraad als positieve electrode van een sterken galvanischen stroom, door een enkel element te weeg gebragt, en waarvan de negatieve electrode een platinadraad is, dan zal er, wanneer men de keten sluit, door beide in water met eenige druppels zuur te dompelen, nagenoeg geene gas-ontwikkeling plaats hebben; brengt men echter de beide electroden in de vloeistof even

met elkander in aanraking, dan geschiedt de ontleding van het water met hevigheid, doch houdt een oogenblik daarna op. Dezelfde werking verkrijgt men, wanneer men het ijzer, terwijl het in de vloeistof gedompeld is, met een oxydeerbaar metaal aanraakt.

Ook zonder galvanischen stroom kan het ijzer in dezen toestand gebragt worden, die door Schönbein *passieve toestand* of *passiviteit* genoemd is. Herschell vond, dat wanneer men een stuk week ijzer in salpeterzuur dompelt, waarvan de digtheid 1,3 bedraagt, het aanstonds bruin wordt, daarna roodachtig onder ontwikkeling van gas, doch dat vervolgens alle werking ophoudt. Het zuur oefent er dan geene werking meer op uit; wrijft men het stuk, dan verliest het echter deze eigenschap; een enkel aanraken met een ander oxydeerbaar metaal, zoo als toen het positieve electrode in de galvanische keten was, is daartoe echter niet voldoende; geschiedt dit in eene electrolytische vloeistof, dan gaat de passiviteit daarentegen wel verloren. Eindelijk kan men ook een ijzerdraad passief maken door het roodgloeijend te maken en daarna te laten bekoelen; wordt het vervolgens gedompeld in salpeterzuur van 1,35 soortelijk gewigt, dan oefent het zuur op het ijzer geene werking uit. Wordt een passief ijzerdraad in aanraking gebragt met een gewoon ijzerdraad, en beide tegelijk in salpeterzuur gedompeld, dan blijkt het, dat het laatste door den invloed van het eerste eveneens passief geworden is.

De passiviteit kan verscheidene dagen voortduren, wanneer men het ijzer steeds in het salpeterzuur gedompeld houdt, of ook wanneer men het in de lucht bewaart. Door wrijving verliest het echter deze eigenschap. In den passieven toestand heeft ijzerdraad nagenoeg alle eigenschappen van platinadraad. Men kan het als positieve electrode bij eene galvanische keten gebruiken, en de ontwikkeling van zuurstof heeft aan zijne oppervlakte even goed plaats, als bij eene platina-electrode.

Deze eigenschappen moeten volgens Schönbein worden toegeschreven aan een dun laagje oxyd, dat zich op de oppervlakte van het ijzer neêrzet, en waardoor het kan wederstand bieden aan de werking der zuren. In dit opzigt is er eenige overeenkomst tusschen dit verschijnsel en de polarisatie der electroden, welke eveneens, zoo als wij (293) gezien hebben, aan een dun laagje, dat zich aan de oppervlakte gevormd heeft, moet worden toegeschreven.

Dergelijke eigenschappen als bij het ijzer zijn door Beetz (1844) en anderen ook waargenomen bij het bismuth, nikkel en kobalt, doch niet in zoo sterken graad als bij het ijzer.

295. **Electro-negatieve en electro-positieve stoffen.** — Uit hetgeen aangaande de scheikundige werking van den galvanischen stroom is gezegd blijkt ten duidelijkste het naauw verband, dat er moet bestaan tusschen de electrische en de scheikundige krachten; hoewel beide niet als dezelfde kunnen beschouwd worden, zoo is nogtans de invloed van de eene op de andere niet te miskennen, daar men door de electriciteit de scheikundige verwantschap in het eene geval kan doen toenemen, in het andere geval doen verminderen.

Wij zullen hier in geene bijzonderheden treden aangaande de theoretische beschouwingen, waardoor Ampère, Davy en anderen geleid zijn, om de werkingen van de verschillende electriciteiten der ongelijksoortige atomen op elkander te verklaren, en daaruit de verschillende licht- en warmteverschijnselen af te leiden. Het meest waarschijnlijke is, dat alle moleculen de eigenschap bezitten om bij aanraking eene tegenovergestelde electriciteit aan te nemen; bij de verbinding van twee stoffen zal dan of de eene of de andere electriciteit de overhand behouden, en de eigenschap der verbinding zal daarvan afhangen.

Wij hebben reeds gezien, dat uit eene zelfde scheikundige verbinding elk bestanddeel steeds aan dezelfde pool wordt afgescheiden; uit eene andere verbinding kan echter de afscheiding derzelfde grondstof ook aan de andere pool plaats hebben. Wordt bijv. ammonia (NH_3) ontleed, dan scheidt zich de stikstof aan de positieve, de waterstof aan de negatieve pool af; bij de ontleding daarentegen van eene verbinding van stikstof met zuurstof heeft de afscheiding van zuurstof aan de positieve, die van stikstof aan de negatieve pool plaats. De stof, die aan de negatieve pool wordt afgescheiden, noemt men electropositief; die, welke zich aan de positieve afzondert, daarentegen electronegatief. Stikstof is dus electro-negatief ten opzigte van waterstof, maar electro-positief ten opzigte van zuurstof.

Berzelius heeft het eerst eene tabel zamengesteld, waarin de grondstoffen zoodanig waren gerangschikt, dat elke ten opzigte van de voorgaande electropositief, doch ten opzigte van de volgende electro-negatief was; zij begon dus met het meest electro-negatieve ligchaam, en eindigde met het meest electro-positieve. Zoodanige tabel is de volgende, waarin echter alleen de meest voorkomende grondstoffen zijn opgenomen:

—	Antimonium.	Nikkel.
Zuurstof.	Silicium.	Zink.
Zwavel.	Goud.	Waterstof.
Stikstof.	Platina.	Mangaan.
Chloor.	Kwikzilver.	Aluminium.
Bromium.	Zilver.	Magnesium.
Jodium.	Koper.	Calcium.
Phosphorus.	Bismuth.	Strontium.
Arsenicum.	IJzer.	Baryum.
Chromium.	Tin.	Natrium.
Borium.	Lood.	Kalium.
Koolstof.	Kobalt.	+

Kalium is dus electro-positief, zuurstof electro-negatief ten opzigte van alle andere ligchamen. Wat de zamengestelde stoffen aangaat, moeten zuren als electro-negatief, bases als electro-positief beschouwd worden.

296. **Toepassingen der scheikundige werking van den galvanischen stroom; galvanoplastiek.** — Men heeft van de scheikundige werking van den galvanischen stroom en vooral van de bovengemelde eigenschap, dat zich aan eene der polen een metaal kan afzetten, eene nuttige toepassing gemaakt door de zoogenaamde *galvanoplastiek*, dat is de kunst om door middel van den galvanischen stroom naauwkeurige afdrukken van voorwerpen te verkrijgen.

Hoewel Daniell en de la Rive reeds vroeger de opmerking hadden gemaakt, dat het koper, hetwelk zich aan de negatieve electrode neêrzet, wanneer deze van platina is, de ongelijkheden van het platinaplaatje volkomen teruggeeft, zoo waren toch Jacobi in Rusland en Spencer in Engeland in het jaar 1837 de eersten, welke van deze opmerking partij wisten te trekken, en in die werking een middel zagen om volkomen zuivere afdrukken van eenig voorwerp te verkrijgen. Het bleek hun, dat om eenen goed zamenhangenden neêrslag te verkrijgen, de stroom zeer zwak doch standvastig moet zijn, en dat de oplossing van kopervitriool (zwavelzuur koperoxyd), waaruit het koper wordt neêrgeslagen, steeds verzadigd moet blijven. De galvanoplastiek heeft sedert dien tijd talrijke verbeteringen ondergaan, en aan hare toepassing is eene groote uitbreiding gegeven.

Begeert men afdrukken van medailles of dergelijke kleine voorwerpen te vervaardigen, dan gebruikt men veelal den in fig. 269 afgebeelden toestel.

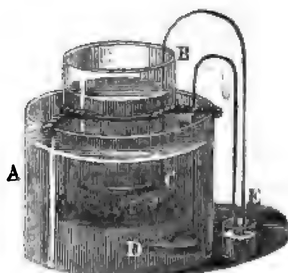
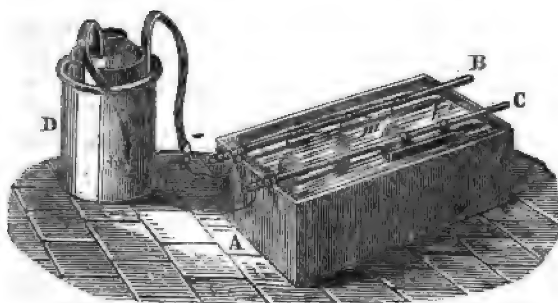


Fig. 269.

Deze bestaat uit een glazen of aarden vat A, waarin men eene verzadigde oplossing van kopervitriool geschonken heeft; daarin plaatst men met behulp van een koperdraad een glazen cilinder B zonder bodem, doch dien men van onderen met eene blaas gesloten heeft. Vervolgens neemt men een stuk zink C, waaraan men een koperdraad bevestigd heeft, en plaatst dit binnen in den cilinder B, nadat men er zeer verdund zwavelzuur ingeschonken heeft; de medaille of de vorm D, waarvan men een afdruk verlangt, wordt eveneens met een koperdraad voorzien en in de blaauwe oplossing van het koperzout gedompeld. Om de keten te sluiten is het voldoende de beide koperdraden in een klein bakje E met kwikzilver te dompelen. In dit geval vervult de metalen vorm D zelf de plaats van het electro-negatieve metaal in het element van Daniell; het koper van de zoutoplossing zet zich daartegen langzamerhand aan, en kan, wanneer de laag dik genoeg gevonden is, gemakkelijk er afgenomen worden; te dien einde is het echter noodig den vorm, na hem goed schoon gemaakt te hebben, even boven de vlam van eene olielamp of van hars te houden, of met een vetachtig borsteltje in te wrijven, alvorens hem in de oplossing te dompelen. Door in die oplossing gedurig nieuwe kristallen van kopervitriool te doen, of nog beter, door die in een bakje met doorboorde wanden in de oplossing te plaatsen, kan men deze steeds op den gewenschten graad van verzadiging houden.

Fig 270.



In den beschrevenen toestel geschiedt de werking in de cel zelve; men kan echter die ook daarbuiten doen plaats hebben, en kan dan even goed van een element van Grove of van Bunsen gebruik maken, mits slechts de

stroom zwak en standvastig zij. Te dien einde meent men een grooten houten of aarden bak A (Fig. 270), die met eene verzadigde oplossing van kopervitriool gevuld is, en waarover twee metalen staven B en C gelegd zijn, waarvan de eene B met de negatieve, de andere C met de positieve pool van het element D verbonden is. Aan B hangt men door middel van koperdraden alle voorwerpen of vormen op, waartegen men verlangt dat het koper zich zal aanzetten, en aan C eene groote koperen plaat K, die even als de andere voorwerpen in de oplossing gedompeld is. Deze vormt dus de positieve, de aan B opgehangen voorwerpen de negatieve electrode. De koperen plaat dient niet alleen tot sluiting van den keten, maar ook om de oplossing steeds verzadigd te houden. Naarmate zich koper uit de oplossing tegen de aan B opgehangen voorwerpen aanzet, wordt er zuur vrij; dit zuur lost echter langzamerhand het koper van de plaat op, zoodat de oplossing steeds verzadigd blijft. Aan dezen toestel is dit voordeel verbonden, dat men dien zoowel tot grootere, als gelijktijdig tot een grooter aantal voorwerpen kan gebruiken.

Verlangt men eene medaille of eenig ander voorwerp na te maken, dan moet men eerst daarnaar eenen vorm vervaardigen, dien men dan in den bak A kan ophangen. Den vorm kan men ook door galvanoplastiek verkrijgen; in dit geval moet men dus den stroom tweemaal dezelfde werking laten doen, eerst om een afdruk van de medaille te verkrijgen, vervolgens om van dezen afdruk op nieuw een afdruk te hebben; deze laatste zal dan zoo volkomen met de medaille zelve overeenstemmen, dat men daarop alle krasjes en oneffenheden terugvindt, die men zelfs niet met het bloote oog op de medaille kan waarnemen. In de meeste gevallen is echter zoodanige naauwkeurigheid niet noodig, en men vervaardigt dus op eene andere wijze een afgietsel van de medaille. Het gemakkelijkst kan dit geschieden door het hiervoor (199) reeds genoemde metaalmengsel van d'Arcet, bestaande uit 4 deelen bismuth, 1 deel lood en 1 deel tin, hetwelk bij eene zeer lage temperatuur smelt. Om te beletten dat het koper zich tegen den achterkant en de rand van den vorm aanzet, bedekt men dien met eene dunne laag was.

Verlangt men een afdruk te maken van eene medaille in gips, dan moet men deze eerst ondoordringbaar maken voor het metaal, door ze in gesmolten stearine te dompelen, dat aanstonds in de porien dringt. Daar echter het koper zich niet aanzet tegen zoodanige oppervlakte, is het noodig den vorm geleidend te maken, door hem door middel van een borsteltje met eene laag potlood te bedekken. Men kan ook, wanneer men onmiddellijk door galvanoplastiek eene medaille wil hebben zoo als het model, eerst een afdruk in stearine vervaardigen naar de met dezelfde stof doortrokken en met eene pot-

loodlaag bedekte medaille, en dan dien vorm, eveneens met potlood bestreken, met de negatieve pool van de galvanische keten in fig. 270 verbinden.

Men heeft zich in den laatsten tijd ook met goeden uitslag van de gutta-percha bediend ter vervaardiging van vormen. Het gemakkelijkst maakt men die, door deze stof in warm water week te maken en daarin alsdan de medaille af te drukken. Deze vorm moet echter, daar ook de gutta-percha een slechte geleider is, even als die van stearine met eene laag potlood bedekt worden.

297. **Galvanische verguldiug en verzilvering.** — Men kan van de scheikundige werking van den galvanischen stroom ook gebruik maken om sommige ligchamen met eene dunne laag koper, zilver, goud, platina of eenig ander metaal te bedekken. Te dien einde worden zij, zoo zij slechte geleiders zijn, eerst bedekt met eene dunne laag potlood. Zijn zij daarentegen goede geleiders, dan moet men zorgen, door de oppervlakte zorgvuldig te reinigen, dat de metaallaag niet losgaat. Het meest wordt van deze eigenschap gebruik gemaakt bij de galvanische vergulding of verzilvering, waarbij men evenzeer moet beginnen met het ligchaam zorgvuldig schoon te maken. Het best geschiedt zulks door het eerst te verhitten en daarna met zeer verdund salpeterzuur en vervolgens nog met zuiver water af te wasschen, althans wanneer het van koper is. Soms wordt het ligchaam daarna ook nog wel gedompeld in een bad van zwavelzuur en salpeterzuur, waarin een weinig keukenzout is opgelost; ten laatste moet het echter zorgvuldig in zuiver water herhaaldelijk afgespoeld worden. Verlangt men ijzeren, stalen, zinken of looden voorwerpen te vergulden, dan is het verkieslijk deze eerst langs den galvanischen weg met eene dunne laag koper te bedekken, daar het goud zich anders niet goed aan de oppervlakte hecht.

Na de reiniging, die hoofdzakelijk dient om de aankleving van de aan te brengen metaallaag op de oppervlakte te bevorderen, wordt het voorwerp aan de negatieve pool van eene batterij, uit 2 of 3 Bunsen'sche elementen bestaande, bevestigd en in eene goudoplossing gedompeld. Als goudoplossing gebruikt men doorgaans eene oplossing van 1 wigtje chloorgoud en 10 wigtjes cyankalium in 2 ons water. Voor het verzilveren maakt men gebruik van eene oplossing van 2 wigtjes cyanzilver en 10 wigtjes cyankalium in $2\frac{1}{2}$ ons water. Als positieve electrode kan men een platinaplaatje gebruiken; wil men echter het bad steeds op denzelfden graad van concentratie houden, dan verbindt men met de platina-electrode een gouden of zilveren plaatje, dat opgelost wordt naarmate zich het metaal uit de oplossing neêrzet aan de oppervlakte van het aan de negatieve pool verbonden voorwerp.

C. MAGNETISME.

298. **Natuurlijke magneten.** — Alvorens nader in beschouwingen te treden aangaande de werking der electrische stroomen, is het noodig eene andere reeks van verschijnselen te leeren kennen, die met de electrische in een naauw verband staan, namelijk die, welke onder den naam van *magnetische* verschijnselen bekend zijn.

Onder de ijzer-mineralen treft men er een aan, dat bij ontleding blijkt zamengesteld te zijn uit drie aequivalenten ijzer en vier aequivalenten zuurstof, en dus door de formule Fe_3O_4 wordt voorgesteld; waarschijnlijk moet men dit mineraal, onder den naam van *magneetsteen* bekend, beschouwen als eene verbinding van ijzeroxyd (Fe_2O_3) en ijzeroxydul (FeO). Deze stof onderscheidt zich door de eigenschap, dat zij in staat is kleine deeltjes ijzer, staal, nikkel, kobalt en andere, vooral echter het ijzer, aan te trekken. Wentelt men een magneetsteen in ijzervijlsel en neemt men hem daarna weder er uit, dan hebben zich talrijke deeltjes ijzer op de oppervlakte vastgehecht, die men echter gemakkelijk met de hand daarvan weder verwijderen kan. Hoewel de ijzerdeeltjes op de eene plaats in grootere hoeveelheid aankleven dan op de andere, zoo is er toch in de wijze, waarop zij aan de oppervlakte verdeeld zijn, doorgaans geene in het oogvallende regelmatigheid waar te nemen.

299. **Kunstmagneten; polen en neutrale lijn.** — Anders is het gelegen, wanneer men dezelfde proef herhaalt met een zoogenaamden kunstmagneet, dat is met eene stalen staaf, aan welke men, op de wijze welke wij later zullen leeren kennen, dezelfde eigenschap heeft medegedeeld. Aan zoodanigen kunstmagneet hechten zich de ijzerdeeltjes, zooals in fig. 271 is afgebeeld. Daaruit blijkt ten duidelijkste, dat de aantrekking bij de uiteinden de sterkste is, terwijl zij vermindert naarmate men tot het midden nadert; in het midden zelf neemt men geene aantrekking waar. Dat gedeelte, waar geene aantrekking plaats heeft, noemt men de *neutrale lijn*, terwijl de beide punten aan de uiteinden, waar de aantrekking de sterkste is, de *polen* genoemd worden.

Fig. 271.



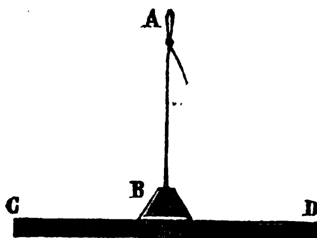
Zeer duidelijk kan men de aantrekking van den magneet op kleine ijzerdeeltjes maken, wanneer men eene platte magnetische stalen staaf bedekt met een stuk papier of karton, en daarop het ijzervijlsel met behulp van eene zeeft strooit. De ijzerdeeltjes plaatsen zich dan het meest op die plaatsen van het papier, waaronder zich de polen bevinden, en vormen eene figuur, waaruit duidelijk blijkt in welke punten de aantrekking het sterkst werkt.

Neemt men, in plaats van gewoon papier, een vel papier dat met stearine doortrokken en met eene dunne laag dier stof bedekt is, en legt men dit op den magneet, dan zullen de ijzerdeeltjes zich daarop evenzoo plaatsen; brengt men dan, terwijl de magneet daaronder blijft liggen, een gloeijend voorwerp, mits niet van ijzer, in de nabijheid, dan smelt de stearine en de daarop liggende ijzerdeeltjes worden, zoodra de stearine weder stijf wordt, op het papier vastgehecht. Op die wijze kan men gemakkelijk de figuur bewaren, die door den magneet zelven gemaakt is.

De oorzaak van de hier vermelde verschijnselen noemt men *magneetkracht*. Wij zullen eerst die verschijnselen zelven meer van nabij leeren kennen, om daarna onderzoek te doen naar den aard dier kracht en haar verband met andere natuurkrachten.

300. **Werking der polen op elkander.** — Wanneer men een magneet (wanneer in het vervolg van magneten gesproken wordt, worden kunstmagneten bedoeld) in horizontalen stand ophangt, zoo als in fig. 272 is voorgesteld, of hem in zijn midden laat rusten op eene punt, zoodat hij gemakkelijk kan ronddraaijen in een horizontaal vlak, dan neemt men verschillende verschijnselen waar. In de eerste plaats merkt men op, dat de magneet, indien hij vrij is in zijne bewegingen, hetgeen het geval zal zijn indien de draad AB lang is en geringe wringkracht heeft, steeds een bepaalden stand aanneemt, en wel eenen zoodanigen, dat zijn eene uiteinde of pool nagenoeg naar het noorden is gerigt; aan die pool geeft men den naam van *noordpool*, aan de andere dien van *zuidpool*. Wat de oorzaak is, dat de magneet steeds die rigting aanneemt, laten wij voor het oogenblik in het midden; later komen wij daarop terug. Brengt men nu echter een der uiteinden van een tweeden magneet beurtelings in de nabijheid van elke der polen van den

Fig. 272.



magneet CD, dan zal men bevinden, dat de eene pool wordt aangetrokken, doch de andere afgestooten. Draait men vervolgens den magneet, dien men in de hand houdt, om, zoodat zijn tegenovergesteld uiteinde naar den opgehangen magneet gekeerd is, dan zal men bevinden dat de pool, die bij de eerste proef werd aangetrokken, thans wordt afgestooten, terwijl omgekeerd de eerst afgestootene nu wordt aangetrokken. Wil men nader onderzoeken, welke polen elkander aantrekken en welke elkander afstooten, dan hange men den tweeden magneet even als den eersten door middel van een draad op. Men zal dan bevinden, dat de pool, waardoor de noordpool aan den magneet CD werd afgestooten, nu eveneens naar het noorden gerigt is. Daaruit volgt dus, dat de beide gelijknamige polen elkander afstooten, doch dat de ongelijknamige elkander aantrekken. De beide krachten, die men in de twee helften van den magneet waarneemt, en die aanvankelijk dezelfde schenen, blijken dus juist aan elkander tegenovergesteld te zijn.

301. **Hypothese aangaande den aard der magneetkracht.** — De magneetkracht is geene kracht, die men kan beschouwen als steeds met de stof zelve verbonden; dit blijkt uit de omstandigheid, dat eene stalen staaf in haren gewonen toestand geene magnetische verschijnselen vertoont, doch slechts door eene bijzondere bewerking in den magnetischen toestand kan gebragt worden. Men heeft daarom aangenomen, dat de oorzaak der verschijnselen moet gezocht worden in eene vloeistof van soortgelijken aard als bij de electrische ligchamen wordt ondersteld (245). Even als daar, is men dan ook verpligt de tegenwoordigheid van twee zoodanige magnetische vloeistoffen aan te nemen, omdat men ook hier in de twee polen van eenen magneet tegenovergestelde eigenschappen waarneemt. De eene, welke hare werking meer bijzonder aan de noordpool vertoont, noemt men de *noordpool-vloeistof*, de andere de *zuidpool-vloeistof*. Wordt er dus gesproken van aantrekking of afstooting van polen, dan moet die werking niet worden toegeschreven aan de stof zelve, maar aan de aldaar aanwezige magnetische vloeistoffen; in plaats van dus te zeggen, dat gelijknamige polen elkander afstooten, zegt men juister, dat gelijknamige magnetische vloeistoffen elkander afstooten, en evenzoo, dat ongelijknamige vloeistoffen elkander aantrekken.

Sommige ligchamen, welke door den magneet worden aangetrokken, zooals ijzer, staal, nikkel, kobalt en eenige andere, worden ondersteld in hun natuurlijken toestand de beide magnetische vloeistoffen te bevatten, doch in eenen zoodanigen toestand, dat zij elkander neutraliseren en dus geene werking naar buiten uitoefenen. Deze ligchamen worden *magnetische* genoemd.

Enkele ligchamen, zooals bismuth, lood, phosphorus en eenige andere, hebben juist de tegenovergestelde eigenschap, namelijk dat zij door een magneet worden afgestooten; men noemt deze *diamagnetische* ligchamen. Later zullen wij meer bepaald op deze verschijnselen terugkomen.

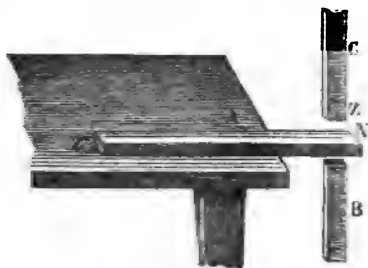
302. **Werking van een magneet op week ijzer.** — Wanneer men de kleine stukjes ijzer, die zich aan de oppervlakte van een in ijzer vijlsel gehouden magneet bevinden, naauwkeurig gadeslaat, dan ziet men dat sommige niet onmiddellijk in aanraking zijn met den magneet zelven, maar aangetrokken worden door andere deeltjes, welke daarmede wel in aanraking zijn. Daaruit kan men afleiden, dat die ijzerdeeltjes onder den invloed van den magneet zelven magnetische eigenschappen verkrijgen. Duidelijker blijkt dit, wanneer men dezelfde proef meer in het groot herhaalt. Men brengt in de nabijheid van eenen sterken magneet een stuk week ijzer, dat daardoor wordt aangetrokken en er aan blijft hangen. Brengt men een tweede stuk ijzer in de nabijheid van het eerste, dan ziet men, dat dit door het eerste stuk wordt aangetrokken en dat het eveneens daaraan blijft hangen. Is de magneet sterk, dan kan men aan dit tweede stuk ijzer nog een derde, aan dit weder een vierde, enz. ophangen. Verwijdert men nu voorzigtig het eerste stuk week ijzer van den magneet, dan zullen aanstonds alle die stukken hunne aantrekkingskracht verliezen en van elkander vallen. Zij ontleenden dus die aantrekkende kracht slechts tijdelijk aan den magneet, maar verloren die terstond, toen de invloed van den magneet had opgehouden. Terwijl de verschillende stukken week ijzer nog aan den magneet hangen, kan men door middel van een klein beweegbaar magneetje zich gemakkelijk overtuigen, dat bij elk stuk eene zuidpool en eene noordpool worden waargenomen.

Om dit verschijnsel te verklaren neemt men aan, dat in alle magnetische ligchamen de beide vloeistoffen in eenen neutralen toestand aanwezig zijn, doch dat deze door den invloed van een magneet van elkander gescheiden worden.

Dat de beide vloeistoffen elkander neutraliseren, kan gemakkelijk worden aangetoond door de volgende proef. Aan de noordpool N van een magneet A (Fig. 273) blijft een stukje week ijzer B hangen; brengt men nu de zuidpool Z van een tweeden magneet C, van ongeveer dezelfde kracht als A, in de nabijheid van de noordpool N van den eersten, dan wordt B terstond losgelaten. Beide magneten ontwikkelen in het week ijzer magnetisme, maar van verschillende soort; de magneet A maakt dat

de zuidpool-vloeistof zich naar het bovenste gedeelte van B begeeft; C doet daarentegen de noordpool-vloeistof naar datzelfde uiteinde toestroomen, zoodat door dien dubbelen invloed B weder in zijnen gewonen neutralen toestand geraakt.

Fig. 273.



303. **Coërcitief-kracht.** — Herhaalt men de zoo even beschrevene proeven met stukjes staal in plaats van met week ijzer, dan wordt niet volkomen hetzelfde waargenomen. In de eerste plaats wordt het staal niet zoo schielijk onder den invloed van een magneet zelf magnetisch, en is het daartoe zelfs noodig het met den magneet te wrijven; ten tweede behoudt het, wanneer het eenmaal magnetisch geworden is, die kracht ook dan wanneer het niet meer met den magneet in aanraking is. Het staal wordt dus minder gemakkelijk magnetisch, maar het verliest daarentegen de eenmaal ontvangen magneetkracht niet weder. Deze eigenschap van het staal noemt men *coërcitief-kracht*. Volkomen juist is die naam niet, want het is minder eene kracht dan eene eigenschap, welke men daaraan moet toeschrijven, dat het staal een slechter geleider voor de magnetische vloeistoffen is, en een zekeren wederstand biedt aan hare scheiding; die wederstand is dus eigenlijk hetgeen men coërcitief-kracht noemt.

304. **Ontstaan van nieuwe polen bij het doorbreken van een magneet.** — Wanneer men eene magnetisch gemaakte breinaald heeft, dan kan men daaraan even als aan eene dikkere staaf de polen en de neutrale lijn aanwijzen. Breekt men zoodanige naald midden door, dan zou men vermoeden, dat de eene helft op de noordpool van een opgehangen magneet eene aantrekkende kracht moet uitoefenen, terwijl dezelfde pool door de andere helft moet worden afgestooten. Dit heeft echter niet plaats. Brengt men namelijk eene dier helften bij den opgehangen magneet, dan zal men bevinden, dat aan het uiteinde, waar zich vroeger eene der polen bevond, nog diezelfde pool aanwezig is, doch dat aan het andere uiteinde, waar de naald doorgebroken is, zich eene nieuwe pool gevormd heeft, tegenovergesteld aan de eerstgenoemde. Het stuk van den oorspronkelijken magneet is dus op nieuw een volkomene magneet geworden; er heeft zich eene pool gevormd, waar die vroeger

niet aanwezig was, en eene neutrale lijn, waar vroeger aantrekking plaats had. Hoe dikwijls men deze proef ook herhaalt door een der stukken van de naald op nieuw door te breken, telkens is elk der afgebrokene stukken weder een volkomen magneet.

Deze verschijnselen kunnen zeer wel met de hiervóór uiteengezette theorie van twee tegenovergestelde vloeistoffen worden in verband gebragt. Men moet namelijk aannemen, dat de beide magnetische vloeistoffen eenparig verspreid zijn over elk molecule van het ijzer of het staal, wanneer deze zich niet in den magnetischen toestand bevinden, doch dat, wanneer zij onder den invloed gebragt worden van eene kracht, welke eene scheiding dier beide vloeistoffen bewerkt, elke van deze zich naar een tegenovergesteld uiteinde van elk molecule begeeft; de magnetische vloeistoffen gaan dus niet van het eene stofdeeltje op het andere over, maar elk behoudt zijne eigene. In een magneet moet men zich dus voorstellen, dat de moleculen zich in den in fig. 274 aangeduiden toestand bevinden. Elk deeltje vormt dan als 't ware een magneet, aan den eenen kant bij *a* de noordpool-vloeistof, aan den anderen kant *b* de zuidpool-vloeistof, en in het midden de neutrale lijn hebbende. Aan de beide uiteinden, bij *a* en b_n, zijn de vloeistoffen vrij; in alle andere punten, waar steeds twee tegenovergestelde vloeistoffen naar elkander gekeerd zijn, wordt de werking grootendeels geneutraliseerd. Men zal dus inzien, dat wanneer een magneet doorgebroken wordt, de toestand der deeltjes bij elk der stukken dezelfde moet zijn als in den oorspronkelijken magneet, en dat dus elk stuk op zich zelf ook weder een volkomen magneet moet vormen.

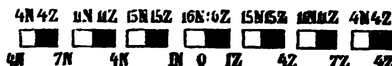
Fig. 274.



Waren de magnetische vloeistoffen in alle deeltjes even sterk van elkander gescheiden, dan zoude daaruit volgen, dat alleen aan de beide uiteinden vrije magneetkracht merkbaar was, terwijl op alle overige punten neutralisatie tusschen de ongelijknamige polen van elk paar naast elkander gelegene deeltjes plaats moest hebben. Dit is echter in strijd met de waarneming; reeds de proef met het ijzervijlsel (299) en ook een naauwkeuriger onderzoek naar de magneetkracht in de verschillende deelen van een kunstmagneet doen het zien, dat wel in het midden geene werking wordt waargenomen, maar dat de magneetkracht toeneemt naarmate men tot de polen nadert, alsook dat de polen niet geheel aan de uiteinden maar op eenigen afstand daarvan gelegen zijn. Dit verschijnsel kan alleen dan verklaard worden, wanneer men aanneemt, dat de scheiding der vloeistoffen in het midden der staaf de sterkste

is. Als voorbeeld nemen wij eene verdeeling, zoo als in fig. 275 is voorgesteld. De boven de deeltjes geplaatste getallen wijzen de betrekkelijke hoeveelheid der in elk deeltje gescheiden vloeistoffen aan; de letter N duidt de noordpool-, Z de zuidpool-vloeistof aan. De daaronder geplaatste getallen wijzen de resulterende magnetische werkingen aan, ontstaande door de werking van twee naast elkander gelegene deeltjes op elkander. Men zal zich gemakkelijk kunnen overtuigen, dat alleen door dergelijke getallen als in dit voorbeeld aan te nemen, en wel bepaaldelijk eene vermindering, naarmate men tot de uiterste moleculen nadert, eene resulterende werking kan verkregen worden, welke met de waarneming overeenkomt. De ongelijkheid der hoeveelheid gescheidene vloeistoffen in de onderscheidene deeltjes moet alleen aan de werking dier deeltjes op elkander worden toegeschreven. Om dit aan te toonen zouden wij in meer ingewikkelde wiskundige beschouwingen moeten treden, die hier minder op hare plaats zouden zijn.

Fig. 275.



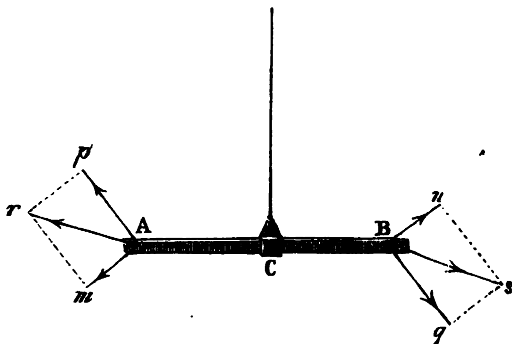
Hetgeen wij hier en vroeger (301) omtrent twee magnetische vloeistoffen hebben gezegd, moet slechts beschouwd worden als eene hypothese, of eigenlijk als een hulpmiddel om van de verschijnselen rekenschap te geven. Het is niet onwaarschijnlijk, dat magnetisme even als electriciteit en warmte moet beschouwd worden als een bewegingstoestand, hetzij der atomen zelven, hetzij van eene overal verspreide uiterst ijle stof. In den laatsten tijd zijn door verschillende natuurkundigen pogingen in het werk gesteld om de verschijnselen op die wijze te verklaren; deze theorie is evenwel nog niet genoegzaam ontwikkeld geworden, om ze hier te kunnen opnemen.

305. **Aard-magnetisme; declinatie van de magneetnaald.** — Wij hebben reeds de opmerking gemaakt (300), dat eene vrij opgehangene of eene op eene scherpe punt beweegbare magneetnaald steeds eenen bepaalden stand aanneemt, en dat eene der polen altijd naar den kant van het noorden gerigt is. Het vertikale vlak, gaande door de rigting welke de magneetnaald aanneemt, noemt men den magnetischen meridiaan; den grooteren of kleineren hoek tusschen dit vlak en den geographischen meridiaan noemt men de *afwijking* of *declinatie* van de magneetnaald.

De oorzaak van dit verschijnsel moet in de aarde zelve gezocht worden, welke op de magneetnaald eenen invloed uitoefent, alsof zij zelve een groote magneet was, waarvan de polen binnen den aardbol gelegen zijn, de eene in

het noordelijk, de andere in het zuidelijk halfrond, en beide niet ver van het middenpunt der aarde verwijderd. Stellen wij, dat eene magneetnaald zoodanig op eenig punt aan de oppervlakte der aarde is opgehangen, dat zij zich alleen in een horizontaal vlak kan bewegen, dan zullen beide magnetische polen der aarde op die naald eene zekere werking uitoefenen. De magnetische noordpool van de aarde zal op de pool A van den magneet AB (Fig. 226) eene aantrekking, op de andere pool B eene afstootende kracht uitoefenen, welke krachten wegens den grooten afstand als evenwijdig en gelijk mogen beschouwd worden, en dus door de evenwijdige lijnen Am en Bn kunnen worden voorgesteld. De magnetische zuidpool zal eene gelijke werking uitoefenen, doch op de pool A afstootend, op B aantrekkend werken, zoodat die krachten door Ap en Bq kunnen worden voorgesteld. De zamengestelde of resultante van Ap en Am is Ar, die van Bn en Bq is Bs; de beide krachten Ar en Bs zijn, even als Ap en Bq en als Am en Bn, twee evenwijdige, gelijke, doch in tegenovergestelde rigting werkende krachten, en vormen dus een koppel (33), waarvan het eenige gevolg zijn kan, dat de naald AB om haar ophangpunt C draait, en dus onder den invloed dier krachten eene bepaalde rigting aanneemt. Dit is geheel in overeenstemming met hetgeen wij gezien hebben; er volgt tevens uit, dat de naald onder den invloed van de magneetkracht der aarde geene voortgaande beweging kan aannemen. Hiervan kan men zich bovendien overtuigen door eene magneetnaald op een houten of kurken schijfje te bevestigen en dit op een stilstaand water te plaatsen. De naald zal dan wel na weinige oogenblikken eene bepaalde rigting aannemen, maar het schijfje zal, behalve dat het omgedraaid is, niet van plaats veranderen.

Fig. 276.



Aan de magnetische pool, die men in het noordelijk halfrond der aarde onderstelt, behoort men den naam van noordpool te geven. Het is deze, die in het noordelijk halfrond den meesten invloed uitoefent en dus oorzaak is, dat

eene der polen van een opgehangen magneet ongeveer naar het noorden is gerigt. Daar nu echter de ongelijknamige magnetische vloeistoffen elkander aantrekken, zoo moet in dat gedeelte van de magneetnaald, dat naar het noorden gekeerd is, de zuidpool-vloeistof de overhand hebben; daaruit volgt dus, dat wij ten onregte aan die pool den naam van noordpool hebben gegeven. Daar men echter doorgaans haar dien naam geeft, daarbij meer acht gevende op de hemelstreek, waarnaar zij gerigt is, dan op de magnetische vloeistof, welke daarin de overhand heeft, zoo zullen wij ook in het vervolg die minder juiste benaming behouden.

Eene in het zuidelijk halfrond opgehangen magneetnaald zal ongeveer naar het zuiden gerigt zijn; de zuidpool van de naald wordt aangetrokken door de magnetische zuidpool der aarde. Uit de wijze, waarop de aarde op zoodanige naald werkt, moet voorts noodzakelijk volgen, dat de declinatie niet overal dezelfde kan zijn. Fig. 276 toont het terstond aan, dat verandering in grootte en rigting der krachten Ap, Am, Bq en Bn op de rigting der resultanten Ar en Bs een grooten invloed moet uitoefenen.

306. **Inclinatie van de magneetnaald.** — Wij hebben bij de voorgaande beschouwing ondersteld, dat de naald in het midden opgehangen was en wel op zoodanige wijze, dat alleen beweging in een horizontaal vlak mogelijk is. Was de naald geheel vrij in hare bewegingen om haar middenpunt, dan zoude zij zoodanigen stand aannemen, dat zij zich niet in een horizontaal vlak bevond. Zoodanige wijze van ophanging zoude echter, zoo al niet onmogelijk, toch zeer moeijelijk zijn.

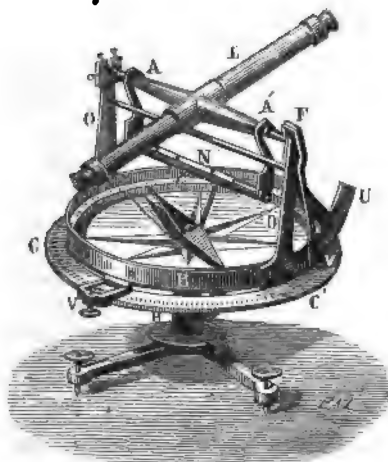
Hangt men eene magneetnaald op in haar zwaartepunt, doch zoodanig dat zij zich alleen om eene horizontale as in een vertikaal vlak kan bewegen, en plaatst men den toestel zoo, dat dit vertikale vlak zamenvalt met dat van den magnetischen meridiaan, dan zal men bevinden, dat de naald eenen schuinen stand aanneemt, zoodat zij met het horizontale vlak eenen hoek van ongeveer 68° maakt. De noordpool der naald is in dit geval naar de noordpool der aarde toegekeerd, daar deze in het noordelijk halfrond het sterkst wordt aangetrokken. In het zuidelijk halfrond zoude het juist het tegenovergestelde zijn. Men kan hier gemakkelijk dezelfde redenering toepassen als voor de declinatie, ten einde aan te toonen, dat ook hier de werking evenzoo is, als of er een koppel op de naald werkte.

Den hoek, dien de naald met het horizontale vlak maakt, noemt men hare *inclinatie* of *helling*. Uit den aard der zaak moet deze zeer verschillend zijn

op verschillende plaatsen van de oppervlakte der aarde, even als zulks met de declinatie het geval is.

307. **Bepaling van de declinatie.** — Om de declinatie van de magneetnaald op eene plaats te bepalen maakt men gebruik van de *declinatie-boussole* of het *declinatie-kompas*, dat in fig. 277 is afgebeeld. Dit werktuig betaat uit een verdeelden cirkel CC′, in welks midden zich eene spil bevindt, waarom de cirkelvormige doos B, die van boven met eene glazen plaat gesloten is en waarin zich eene zeer beweegbare magneetnaald bevindt, kan draaijen. De kijker L kan zich in een vertikaal vlak bewegen; aan de as, waarom hij draaijen kan, is een luchtbel-waterpas N opgehangen, dat dient om na te gaan, of de verdeelde cirkel CC′ zich in een horizontaal vlak bevindt; is dit niet het geval, dan moet hij door middel van de stelschroeven, waarop de geheele toestel rust, in den verlangden stand gebragt worden. De beide koperen pijlers O en O′, waarop de as AA′ rust, zijn aan de metalen doos B bevestigd, en bewegen zich dus te gelijk met deze. Aan dezelfde doos is bovendien een nonius V bevestigd, met behulp van welken men de verdeelingen op den cirkel CC′ kan aflezen. Binnen in de doos is eveneens eene cirkelverdeeling *ee′* aangebragt, waarvan het nulpunt gelegen is in het vertikale vlak, waarin zich de kijker moet bewegen. Eindelijk is aan de as AA′ bij F nog een nonius V′ vastgemaakt, die de bewegingen van dien kijker volgt; is de kijker horizontaal, dan wijst de nonius juist op het nulpunt van den verdeelden cirkelboog U; wordt hij uit dien stand gebragt, dan leest men op dien cirkelboog den hoek af, dien de kijker met het horizontale vlak maakt.

Fig. 277.



Is de toestel behoorlijk gesteld, dan kan men daarmede gemakkelijk de declinatie bepalen. Kent men naauwkeurig de rigting van den aard-meridiaan der plaats, dan heeft men slechts het bovenste gedeelte zoolang te draaijen, tot dat de kijker in het vlak van den meridiaan is en dus juist naar eenig in

dat vlak gelegen punt gerigt is. Na eenige schommelingen zal de magneetnaald in de doos B een bepaalden stand aannemen; de hoek tusschen de magneetnaald en het vertikale vlak, dat door den kijker gaat, welken hoek men aanstonds op den verdeelden cirkel *ee'* kan aflezen, wijst de declinatie aan. Is de rigting van den meridiaan der plaats niet bekend, dan moet men die eerst bepalen.

Bij de bepaling der declinatie op de hier beschrevene wijze gaat men uit van de onderstelling, dat de lijn, welke de beide uiteinden der naald vereenigt, zamenvalt met die, welke tusschen hare beide polen getrokken is. Daar echter de polen niet aan de uiteinden der naald gelegen zijn, zoo is het zeer wel mogelijk, dat een van haar of zelfs beiden een weinig ter zijde gelegen zijn. Is dit het geval, dan zal de aanwijzing der naald niet volkomen juist zijn. Om deze fout der waarneming te vermijden keert men, na op de aangewezene wijze de declinatie bepaald te hebben, de naald om, zoodat de kant, die vroeger onder was, thans boven komt, en bepaalt op nieuw de declinatie. Komen de beide waarnemingen overeen, dan volgt daaruit dat de magnetische as der naald juist zamenvalt met de lijn, tusschen de beide uiteinden getrokken; verschillen de beide aldus gevondene hoeken, dan zal de gemiddelde, dat is de halve som, de ware declinatie zijn. Bij deze en alle dergelijke bepalingen moet men zorgdragen, dat er zich geen ijzer of staal in de nabijheid bevindt, daar zulks op de rigting der naald eenen zeer merkbaren invloed zoude kunnen uitoefenen.

308. **Veranderingen der declinatie.** — Bepaalt men op de voorschrevene wijze de declinatie op eenige plaats in ons land, dan zal men bevinden, dat zij tusschen 18° en 19° bedraagt en westelijk is. Vergelijkt men de aldus gevondene waarde met die, welke in vroegere jaren is gevonden, dan bemerkt men, dat zij aan verandering onderhevig is. Omstreeks het jaar 1600 was zij namelijk oostelijk en bedroeg $9\frac{1}{2}$°. Tegen het midden der 17e eeuw bedroeg zij nog 2°, doch weinige jaren later was zij 0°, zoodat toen bij ons de rigting van den magnetischen meridiaan met den aard-meridiaan zamenviel. Sedert dien tijd is zij steeds westelijk geweest; in 1700 bedroeg zij ruim 10°, in 1750 17°; bij gebrek aan naauwkeurige waarnemingen is het moeijelijk op te geven, wanneer zij haar maximum heeft bereikt; in Parijs is zulks omstreeks het jaar 1814 het geval geweest. In 1827 bedroeg zij te Nijmegen 21° 33', en is na dien tijd steeds afgenomen, zoodat zij te Utrecht in 1844 20° 21' bedroeg, en in 1858 slechts 18° 46'.

Behalve deze veranderingen neemt men ook in den loop van den dag kleine

veranderingen waar, die men meer bepaald door den naam van *variatien* aanduidt. Zij zijn slechts gering, en kunnen alleen met behulp van bijzonder daartoe ingerigte toestellen worden waargenomen. In ons land mag men aannemen, dat de noordpool der naald van des morgens 8½ uur tot omstreeks 1½ uur na den middag zich westwaarts beweegt, en daarna teruggaat tot 's nachts 12 uur; van dat oogenblik tot des morgens ondergaat zij nagenoeg geene verandering. De dagelijksche variatie is des zomers grooter dan des winters; zij bedraagt des zomers tusschen 13′ en 15′, des winters tusschen 8′ en 10′. Hoe verder men zich van den evenaar verwijdert, des te aanzienlijker en onregelmatiger worden de dagelijksche variatien. Men heeft lang gemeend, dat in de nabijheid van den evenaar de declinatie geene dagelijksche veranderingen ondergaat; volgens von Humboldt is dit echter wel het geval.

Behalve deze meer regelmatige veranderingen worden er dikwijls aanzienlijkere veranderingen waargenomen, die men *verstoringen* noemt. Het sterkst bemerkt men die bij aardbevingen, bij uitbarstingen van vuurspuwende bergen, en vooral bij noorderlicht. Zoodanige verstoringen bedragen soms meer dan 2°.

De oorzaak der dagelijksche veranderingen is nog niet met voldoende zekerheid aan te wijzen. Niet onwaarschijnlijk is het, dat zij in den invloed der zon moet gezocht worden, welligt ook eenigzins in dien der maan. Men heeft bij de declinatie ook jaarlijksche veranderingen waargenomen, doch deze zijn nog niet met voldoende naauwkeurigheid bekend.

Vergelijkt men den stand der declinatie-naald op verschillende plaatsen aan de oppervlakte der aarde, dan bemerkt men bij de meeste een groot verschil. Men heeft die plaatsen, waar de afwijking dezelfde is, op de oppervlakte van den aardbol door lijnen vereenigd, aan welke men den naam van *isogonische* lijnen gegeven heeft. Zij hebben, wat hare rigting aangaat, eenige overeenkomst met de geographische meridianen. De isogonische lijn waar de declinatie 0° bedraagt, en die daarom ook wel *agonische* lijn genoemd wordt, loopt van de Hudson-baai naar New-York, daarna door den Atlantischen oceaan naar kaap St. Roch en vervolgens door de zee; het andere gedeelte loopt van Spitsbergen door Aziatisch Rusland, waar zij eene meer oostwaartsche rigting schijnt aan te nemen; althans men vindt haar terug langs Japan; verder loopt zij door Indie langs Bombay, vervolgens langs Java en dwars door Australië. Men ziet, dat dit gedeelte der lijn veel minder regelmatig is dan dat, hetwelk over Amerika loopt. Uit hetgeen zoo even omtrent de veranderingen der declinatie is gezegd, volgt dat de lijn, waar de declinatie 0° is, steeds verandert. In 1663 moet zij over Parijs geloopen hebben.

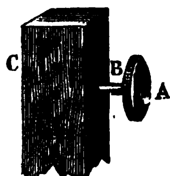
Men heeft kaarten vervaardigd, waarop de isogonische lijnen zijn geteekend, en waarop men dus de declinatie der magneetnaald voor alle plaatsen op de aarde aangewezen vindt. De eerste werden in 1700 door Halley zamengesteld, en na hem door Hansteen, Erman, Barlow en anderen. Deze kaarten zijn voor de zeevarenden van groot gewigt, mits men bij haar gebruik acht geeft op de veranderingen, die de declinatie ondergaat, en ze dus van tijd tot tijd door nieuwe vervangt.

309. **Scheepskompas.** — Eene nuttige toepassing van de eigenschap der magneetnaald van steeds eene bepaalde rigting aan te wijzen, treffen wij aan bij het scheepskompas. Dit is niets dan een gewoon declinatie-kompas, dat echter niet is ingerigt om de declinatie te meten, maar om de rigting aan te wijzen, waarin men het schip behoort te sturen. Het bevindt zich achter op het schip bij den stuurstoel, zoodat de stuurman er steeds het gezigt op hebben kan. Het bestaat uit eene naald, die zich gemakkelijk op eene punt kan bewegen en vastgemaakt is aan een blad kaartpapier, waarop eene zoogenaamde *windroos* is afgebeeld, dat is eene ster met 32 punten, bij welke de namen der verschillende windstreken geschreven staan. De naald is zoodanig daaraan bevestigd, dat het punt waarbij de letter N geplaatst is steeds naar het noorden gerigt is; men heeft dus op de declinatie geen acht meer te geven, wanneer de naald eenmaal goed aan het papier bevestigd is, althans zoolang de declinatie zelve geene aanzienlijke verandering ondergaat; bevindt men zich op eene andere plaats, dan moet eerst de declinatie bepaald worden, ten einde daarna de naald op nieuw zoodanig op de papieren schijf te kunnen bevestigen, dat het punt N naar het noorden gerigt is. Om de beweging niet te belemmeren wordt de doos, waarin zich de kompasnaald bevindt, door middel van twee concentrische ringen opgehangen, zoodat zij altijd, hoe ook het schip moge slingeren, in eenen horizontalen stand blijft. Moet de stuurman bijv. naar het Zuid-Westen sturen, dan heeft hij slechts zoo lang het roer te wenden, totdat de punt der windroos, waarbij de letters ZW staan, zich bevindt bij dat gedeelte van het kompas, dat naar den voorsteven van het schip gerigt is, en waar te dien einde doorgaans een kennelijk teeken is aangebragt. Voor het gebruik bij nacht wordt de papieren schijf van onderen verlicht.

Omtrent den tijd, wanneer het scheepkompas is uitgevonden, heeft men nog geene voldoende zekerheid. Bij de Chinezen schijnt het reeds in gebruik te zijn geweest in de eerste eeuwen na Chr.; in Europa is het voor het eerst in de 12e eeuw bekend geraakt.

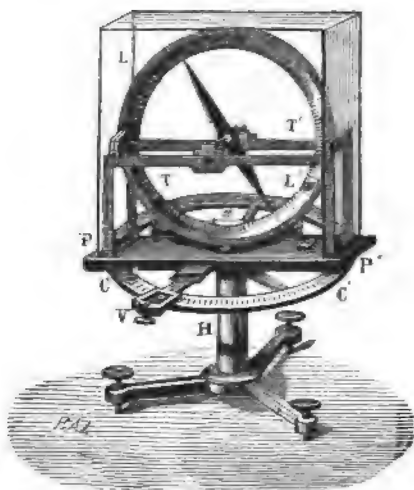
Eene naauwkeurige bepaling van de declinatie op zee, welke, zooals wij gezien hebben, van tijd tot tijd noodzakelijk is teneinde de rigting van het noorden met behulp van het kompas te kunnen aanwijzen, is aan boord van het schip zeer moeijelijk, daar het scheepsijzer eenen zeer merkbaren invloed óp de rigting der naald uitoefent. Van de verschillende middelen om daarin te voorzien voldoet de zoogenaamde correctieplaat van Barlow (1823) het best. Deze bestaat uit eene ijzeren schijf A (Fig. 278), welke men door middel van het staafje B in een der gaten van den houten voet C, waarop het kompas geplaatst wordt, kan steken. Men begint, alvorens onder zeil te gaan, met het kompas op het schip te vergelijken met een kompas aan den wal, en neemt het verschil in declinatiè naauwkeurig waar; dit verschil wordt door den invloed van het scheepsijzer veroorzaakt. Daarna brengt men het kompas, dat men aan boord heeft waargenomen, aan wal, en na zich overtuigd te hebben, dat de beide kompassen hetzelfde aanwijzen, plaatst men het op een dergelijken voet als die, waarop het aan boord geplaatst was, en bepaalt proefondervindelijk, waar en hoe diep men de ijzeren plaat A moet insteken, opdat dit kompas volkomen dezelfde declinatie aanwijze, als toen het zich aan boord bevond. Daarna plaatst men het weder op het schip. Wil men nu op zee de declinatie bepalen, dan moet men twee waarnemingen doen, de eerste zonder en de tweede met de correctieplaat, die juist op dezelfde wijze moet worden aangebragt, als bij de proefneming aan wal. Daar de invloed van deze plaat juist gelijk is aan dien van het scheepsijzer, zoo zal de wijziging der declinatie in het tweede geval juist tweemaal grooter zijn dan in het eerste, zoodat men daaruit dan gemakkelijk, door van de eerste waarneming het verschil van de beide uitkomsten af te trekken, de ware declinatie buiten den invloed van het scheepsijzer kan berekenen.

Fig. 278.



310. **Bepaling van de inclinatie der magneetnaald.** — De toestel, waarvan men zich bedient om met naauwkeurigheid de inclinatie van de magneetnaald te bepalen, is afgebeeld in fig. 279. Even als bij het declinatiekompas kan het geheele bovenste gedeelte draaijen om den voet H, waarop alleen de verdeelde cirkel CC′ onbewegelijk bevestigd is. Het beweegbare gedeelte bestaat uit eene horizontale koperen plaat PP′, waarop de verdeelde vertikale cirkel LL′ stevig bevestigd is. Op dezelfde plaat bevinden zich koperen pijlers, door dwarsstaven T en T′ vereenigd; op deze laatste rust de magneetnaald door middel van eene door haar zwaartepunt gaande stalen

Fig. 279.



as; zij moet zich gemakkelijk in een vertikaal vlak kunnen bewegen, en hare as moet zich in het middenpunt van den cirkel LL′ bevinden. Aan de beweegbare plaat PP′ is een nonius V bevestigd; om te kunnen nagaan of die plaat in eenen horizontalen stand geplaatst is, bevindt zich daarop bij *n* een waterpas.

Uit hetgeen hiervóór reeds is opgemerkt volgt, dat men, om de inclinatie te bepalen, moet zorg dragen den cirkel LL′ eerst in den magnetischen meridiaan te plaatsen. Men kan dien stand gemakkelijk door middel van dezen toestel vinden, wanneer men in aanmerking neemt, dat de inclinatie toeneemt, naarmate het vlak, waarin de naald schommelen moet, een grooteren hoek maakt met den magnetischen meridiaan; dat zij 90° bedraagt, wanneer dat vlak eenen regten hoek maakt met dien meridiaan, en dat dus de inclinatie in dien meridiaan zelven haar minimum bereikt. Men kan dus het bovenste gedeelte van den toestel zoo lang om de as H draaijen, tot de naald haar schuinsten stand heeft aangenomen; of wel, men kan dien eerst in zoodanigen stand plaatsen, dat de naald juist vertikaal staat, en dan met behulp van den nonius V het beweegbare gedeelte 90° omdraaijen. In beide gevallen zal de cirkel LL′, en dus ook het vlak, waarin de naald schommelen moet, met den magnetischen meridiaan zamenvallen.

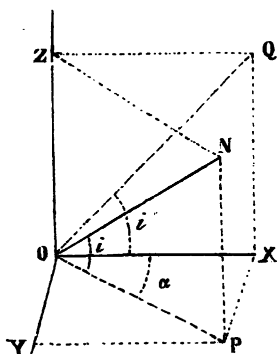
Is de toestel aldus gesteld, dan behoeft men slechts aan den rand LL′ het getal graden af te lezen, dat alsdan de inclinatie zal aanwijzen. Eene minder naauwkeurige aanwijzing, omdat welligt de lijn, die de beide polen van de naald verbindt, niet zamenvalt met die, welke tusschen hare beide uiteinden getrokken is, kan men, even als bij de declinatie, door eene eenvoudige omkeering vermijden.

Eene andere fout kan daardoor veroorzaakt worden, dat het zwaartepunt der naald zich niet juist bevindt in de as, waarom zij zich bewegen kan. Men zal ligt inzien, dat zoo het zwaartepunt een weinig daarboven ligt, de

inclinatie te klein en in het tegenovergestelde geval te groot zal zijn. Om ook deze mogelijke fout in rekening te brengen, neemt men de naald weg en ontneemt haar, door strijken met een sterken magneet, haar magnetisme; vervolgens maakt men haar op nieuw magnetisch, doch zoodanig, dat de noordpool zich thans daar bevindt, waar vroeger de zuidpool was, en omgekeerd. Is het zwaartepunt niet in de as gelegen, dan zal men door middel van de aldus behandelde naald eene grootere of kleinere inclinatie verkrijgen; en daar de aldus gemaakte fout juist in tegenovergestelden zin moet zijn, zal men de juiste waarde vinden door het gemiddelde van beide waarden te nemen.

Wij hebben zooeven gezegd, dat wanneer het vlak, waarin de inclinatienaald schommelen moet, loodregt is op den magnetischen meridiaan, de inclinatie 90° moet zijn en de naald dus een vertikalen stand aannemen. Dit vereischt nadere opheldering. Stellen wij dat ON (Fig 280) de rigting en grootte voorstelt van eene der krachten van het koppel (305), dat op de pool O van de magneetnaald werkt, terwijl ZOX het vlak van den magnetischen meridiaan aanduidt. Men zal die kracht ON dan kunnen ontbinden in drie andere OX, OZ en OY, waarvan de beide eerste in dat vlak gelegen zijn, de eerste horizontaal, de tweede vertikaal, terwijl de derde OY loodregt op dat vlak gerigt is. Is nu de verdeelde cirkel LL′ (Fig. 279) in het vlak ZOX geplaatst, dan zullen alleen de zamenstellende krachten OZ en OX invloed op de naald kunnen uitoefenen. Noemt men den inclinatie-hoek QOX in dat geval i', den hoek NOP $= i$, en den hoek XOP $= \alpha$, dan is

Fig. 280.



$$tang\, i' = \frac{OZ}{OX} = \frac{ON \sin i}{ON \cos i \cos \alpha} = \frac{tang\, i}{\cos \alpha};$$

$tang\, i'$, en dus ook de hoek i', bereikt hare grootste waarde, als $\alpha = 90°$; alsdan is $\cos. \alpha = 0$, $tang\, i' = \infty$ en dus $i' = 90°$; daarentegen bereikt i' haar minimum, wanneer $\alpha = 0$; in dat geval is $i' = i$. Men ziet dus, dat de inclinatie het geringste is, als de naald schommelen moet in het vlak van den magnetischen meridiaan, doch dat zij in een vlak loodregt daarop 90° bedraagt.

311. **Veranderingen der magnetische inclinatie.** — Even als de declinatie, zoo is ook de inclinatie van de magneetnaald aan veranderingen onderhevig; ook is zij op verschillende plaatsen niet dezelfde. Naarmate men op grootere geographische breedte komt, nadert zij meer tot 90°. In de nabijheid van den aequator is zij 0°, zoodat de inclinatie-naald aldaar een horizontalen stand aanneemt. De lijn, op den aardbol getrokken door alle punten, waar geene inclinatie wordt waargenomen, wordt *magnetische evenaar* of *aequator* genoemd; deze verschilt slechts weinig van den aard-aequator, dien hij snijdt in twee punten, het eene in den Atlantischen oceaan, het andere in de groote Zuidzee gelegen. Op twee plaatsen aan de oppervlakte der aarde bedraagt de inclinatie der magneetnaald 90°; men noemt die de *magnetische polen.* De magnetische noordpool is, volgens von Humboldt, gelegen op 70° 5′ N. B. en 99° 5′ W. L. van Parijs, dus in het noorden van Noord-Amerika; de zuidpool bevindt zich ongeveer op 75° 5′ Z. B. en 150° 48′ O. L., dat is, in het groote land, dat zich waarschijnlijk aan de zuidpool der aarde bevindt.

Even als bij de declinatie, zoo heeft men ook door de plaatsen op de aarde, waar eene even groote inclinatie der magneetnaald wordt waargenomen, lijnen getrokken, aan welke men den naam van *isoclinische lijnen* gegeven heeft.

De veranderingen der inclinatie op eene zelfde plaats zijn niet zoo aanzienlijk als die der declinatie. Te Parijs bedroeg zij in 1671 75°; omstreeks het midden der 18e eeuw ongeveer 72°; bij het begin der 19e $69\frac{1}{5}$°; tegenwoordig bedraagt zij aldaar omstreeks 66°. Te Utrecht bedroeg zij op 1 Januarij 1858 68° 11′.

De inclinatie ondergaat ook jaarlijksche en dagelijksche variatiën. Des morgens is zij ongeveer 4′ grooter dan in den namiddag, terwijl zij in den zomer doorgaans 15′ grooter is dan in den winter.

312. **Wetten van de magnetische krachten**. — Tot onderzoek van de wetten, welke bij de magnetische aantrekkingen en afstootingen plaats hebben, heeft Coulomb (1784) gebruik gemaakt van een dergelijken toestel, als ter bepaling van de wetten der electrische aantrekking en afstooting. Deze bestaat uit eene glazen kast A (Fig. 281), waarop een glazen cilinder B is geplaatst, die bewegelijk is, terwijl zich in het deksel tevens eene opening C bevindt, waardoor men een magneet D kan steken. Boven aan den cilinder B bevindt zich een mikrometer G, even als aan den in fig. 223 afgebeelden toestel; in het bovenste bewegelijke gedeelte van den mikrometer wordt een dunne zilverdraad bevestigd, aan welken de magneetnaald E wordt opgehangen.

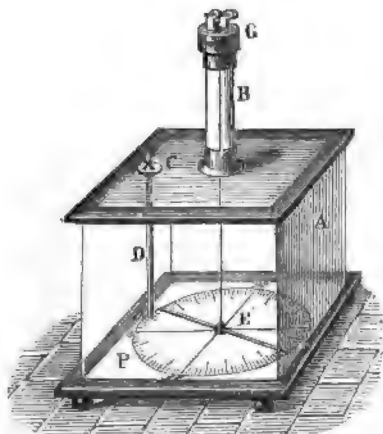


Fig. 281.

Wil men van dezen toestel gebruik maken, dan plaatst men hem zoodanig, dat de lijn, in den verdeelden cirkel P van het nulpunt tot het tegenovergestelde punt getrokken, juist met de rigting, van den magnetischen meridiaan zamenvalt. Vervolgens vervangt men de magneetnaald door een niet magnetisch staafje van gelijk gewigt, en draait den cilinder B en den mikrometer G zoo lang om, tot dat het staafje zich in de rigting van den magnetischen meridiaan, en de mikrometer zich juist op zijn nulpunt bevindt. Plaatst men dan weder de magneetnaald onder aan den zilverdraad, dan zal deze zich in den meridiaan plaatsen, en men kan overtuigd zijn, dat de draad volstrekt niet gewrongen is of geene torsie heeft.

Alvorens de werking van eenen magneet op de naald E te kunnen nagaan, moet men beginnen met den invloed van het aard-magnetisme te bepalen. Dit geschiedt door den draad met den mikrometer zooveel om te draaijen, dat de naald E achtervolgens 1, 2, 3 en meer graden van den evenwigtstoestand afwijkt. Volgens de wetten der wringkracht zullen die omdraaijingen evenredig moeten zijn aan de afwijkingen; haar bedrag is echter afhankelijk van de lengte en dikte van den draad, en moet dus proefondervindelijk bepaald worden. Bij de waarnemingen van Coulomb bedroeg de omdraaijing 35° voor elken graad afwijking. Voor eene afwijking van d graden, moest dus eene omdraaijing van $35d$ graden plaats hebben.

Plaatst men nu door de opening C de magneetstaaf D in dier voege, dat de gelijknamige polen van deze staaf en van de naald E naar elkander zijn gekeerd, dan wordt laatstgenoemde afgestooten. Stellen wij, dat de naald tengevolge van die afstooting d graden afwijkt, dan zijn er twee krachten werkzaam, die haar tot het nulpunt trachten terug te brengen, namelijk de wringkracht van den draad, die men door d, de aard-magneetkracht, die men door αd kan voorstellen; wij zullen namelijk in plaats van het door Coulomb gevondene getal 35 hier het onbepaalde getal α aannemen. De afstootende kracht kan dus door $\alpha d + d$ voorgesteld worden. Vervolgens draait men den mikro-

meter zoo ver om, dat de afwijking d tot de helft $\frac{1}{2}d$ verminderd wordt. Stellen wij, dat daartoe eene omdraaijing van n graden noodig is, dan zal de torsie thans $n + \frac{1}{2}d$ bedragen; de werking van het aard-magnetisme zal dan echter slechts $\alpha \times \frac{1}{2}d$ zijn, zoodat de geheele kracht, door welke de afstooting van d tot $\frac{1}{2}d$ verminderd is, kan worden voorgesteld door $(n + \alpha) \times \frac{1}{2}d$. Vervangt men in deze formule n en d door de waargenomene waarden, alsook het getal α door de waarde, welke men bij den aanvang gevonden heeft, dan zal men bevinden, dat de waarde der laatste formnle juist viermaal grooter is dan die van $\alpha d + d$, en dat dus op eenen tweemaal kleineren afstand de afstooting viermaal grooter is. Door de proef te herhalen voor eenen driemaal kleineren afstand, zal men eene negenmaal grootere kracht vinden; zoodat men tot het besluit komt, dat de magnetische krachten zich verhouden in de omgekeerde reden van de vierkanten der afstanden.

Dezelfde wet kan ook nog op eene andere wijze worden afgeleid, door namelijk eene naald eerst te laten schommelen, zonder eenen magneet in de nabijheid te brengen, en dus alleen onder den invloed van het aard-magnetisme. Stellen wij, dat zij alsdan in eenen zekeren tijd t een aantal van m schommelingen volbrengt. Vervolgens brengt men haar op eenen afstand d van een magneet, en neemt andermaal het getal schommelingen in denzelfden tijd t waar. Is dit getal n, en stelt men de kracht van het aard-magnetisme voor door G, die van den magneet door I, dan is, omdat de krachten zich even als bij den slinger moeten verhouden als de tweede magten van het getal slingeringen, in een zelfden tijd volbragt, en omdat de aardmagneetkracht evenzeer blijft werken, wanneer een magneet bij de schommelende naald gebragt wordt, $G : I + G = m^2 : n^2$. Plaatst men nu den magneet op een anderen afstand d', en volbrengt de naald dan in denzelfden tijd t n' schommelingen, dan heeft men, als de kracht nu door I' wordt voorgesteld, $G : I' + G = m^2 : n'^2$. Uit deze vergelijkingen G eliminerende, vindt men $I : I' = n^2 - m^2 : n'^2 - m^2$, waaruit men de verhouding tusschen de krachten kan afleiden; deze vergelijkende met de afstanden d en d', zal men de bovenvermelde wet bewaarheid vinden.

313. **Intensiteit van het aard-magnetisme.** — De zoo even verklaarde methode der schommelingen is ook zeer geschikt om de intensiteit of sterkte van het aard-magnetisme op verschillende plaatsen te bepalen en onderderling te vergelijken. Men kan daarvoor zoowel eene inclinatie-naald als eene declinatie-naald gebruiken. Laat men eene inclinatie-naald in het vlak van den magnetischen meridiaan schommelen, dan zal de kracht, welke op elke pool werkt, evenredig zijn aan de intensiteit van het aard-magnetisme en dus

aan de tweede magt van het aantal schommelingen, in een zekeren tijd waargenomen. Duiden n en n' het aantal schommelingen aan, en I en I′ de intensiteit van het aard-magnetisme op de beide plaatsen, waar die schommelingen zijn waargenomen, dan heeft men $I : I' = n^2 : n'^2$. Men heeft dan slechts de intensiteit op eene bepaalde plaats als eenheid aan te nemen, om die op andere plaatsen door een cijfer te kunnen uitdrukken.

Men bedient zich echter tot zoodanige waarneming slechts zelden van de inclinatie-naald, omdat eene niet volkomen juiste plaatsing van het zwartepunt der naald in de as, waarom zij zich beweegt, op den duur der schommelingen van invloed moet zijn. Meestal gebruikt men eene horizontale declinatienaald. Daarbij valt echter op te merken, dat deze niet schommelt onder den invloed van de geheele aard-magneetkracht, maar slechts van hare horizontale zamenstellende, die door $I \cos i$ wordt voorgesteld, wanneer i de inclinatie aanduidt. In dit geval heeft men dus $I \cos i : I' \cos i' = n^2 : n'^2$, zoodat men bij zoodanige waarneming ook op de grootte der inclinatie moet acht geven. De grootheid $I \cos i$, welke de horizontale zamenstellende is van de intensiteit, noemt men de horizontaal-intensiteit, in tegenstelling van de geheele sterkte der magneetkracht, die in de rigting der inclinatie-naald werkt, en aan welke men den naam van totaal-intensiteit geeft.

De onderzoekingen omtrent de intensiteit van het aard-magnetisme hebben doen zien, dat zij over het algemeen toeneemt, naarmate men zich van den magnetischen aequator verwijdert. Von Humboldt heeft als eenheid aangenomen de totaal-intensiteit, die door hem is waargenomen in Lima op 7° 2′ Z. B. en 81° 8′ W. L. van Parijs, welk punt in den magnetischen aequator gelegen is. Te Parijs is alsdan de intensiteit 1,348, te London 1,372, te Christiania 1,432. Veelal maakt men echter van eene andere eenheid gebruik, door Gauss het eerst ingevoerd, die nagenoeg 3,5 maal kleiner is; doorgaans wordt dan niet de totaal-intensiteit, maar de horizontaal-intensiteit, tegelijk met de inclinatie, opgegeven. Zoo was bijv. voor Utrecht de horizontaal-intensiteit in eenheden volgens Gauss op 1 Januarij 1858 1,766, terwijl de inclinatie $i = 68° 11'$ was. Hieruit volgt, dat de totaal-intensiteit te Utrecht op dat tijdstip 4,74 dier zelfde eenheden bedroeg. Voor London vindt men op gelijke wijze voor de totaal-intensiteit 4,80, voor Parijs 4,71, voor Christiania 5,01. De engelsche natuurkundigen gebruiken nog weder eene andere eenheid, door Sabine ingevoerd, welke 2,177 maal kleiner is dan die van Gauss. Volgens die bedraagt de totaal-intensiteit te Utrecht 10,32.

De lijnen door de punten van den aardbol getrokken, waar de totaal-intensiteit dezelfde is, heten *isodynamische* lijnen; haar loop is vrij onregelmatig.

Het punt, waar de geringste intensiteit is waargenomen, bevindt zich op 20° Z. B. en 37° 24′ W. L.; zij bedraagt daar 0,7062, als men de eenheid van von Humboldt aanneemt, of 2,47 volgens Gauss. De grootste intensiteit in het zuidelijk halfrond, 2,06 volgens von Humboldt of 7,20 volgens Gauss, is waargenomen op 64° Z. B. en 135° 10′ O. L.; het punt in het noordelijk halfrond, waar de intensiteit de grootste is, namelijk 1,878 volgens von Humboldt of 6,57 volgens Gauss, ligt op 52° 19′ N. B. en 94° 20′ W. L. Behalve deze twee punten der sterkste intensiteit is er in elk halfrond nog een tweede, waar zij wel minder aanzienlijk is dan in de beide zoo even gemelde, maar toch grooter dan in alle omliggende punten.

De intensiteit van het aard-magnetisme is, even als de declinatie en inclinatie, aan dagelijksche en jaarlijksche veranderingen als ook aan aanzienlijker verstoringen onderhevig.

314. **Magnetiseren van stalen staven.** — Na in de voorgaande bladzijden de eigenschappen der magneten uiteengezet te hebben, blijft er nog over de middelen aan te wijzen, waardoor men aan stalen staven magnetisme kan mededeelen, en ze dus tot kunstmagneten maken. Die middelen zijn: 1° het op eene bepaalde wijze strijken van de stalen staven met een magneet; 2° het slaan, buigen of vijlen van de staaf; 3° de invloed van het aard-magnetisme; 4° electrische stroomen. Wij zullen ons vooreerst alleen met de drie eerste middelen bezig houden; de magnetisering door een electrischen stroom zullen wij eerst later beschouwen, wanneer wij het verband tusschen magnetisme en electriciteit meer van nabij hebben leeren kennen.

Vooraf moet echter nog opgemerkt worden, dat men aan eene stalen staaf slechts eene bepaalde hoeveelheid magnetisme kan mededeelen. Wel kan onder den invloed van sterke magneten eene stalen staaf zeer sterk magnetisch worden, maar de ondervinding heeft geleerd, dat die toestand slechts tijdelijk is, en dat het magnetisme langzamerhand afneemt, totdat het eene bepaalde grens genaderd is. In dien toestand is de magneet verzadigd; die hoeveelheid magnetisme kan de staaf altijd behouden. De oorzaak der vermindering moet gezocht worden in het streven der beide vloeistoffen om zich weder te vereenigen; alleen de coërcitief-kracht verzet zich daartegen; zoodra deze beide krachten gelijk geworden zijn, en er dus evenwigt tusschen haar ontstaan is, verandert de toestand der staaf niet meer, zoolang niet door uitwendige oorzaken het magnetisme haar geheel of gedeeltelijk ontnomen wordt.

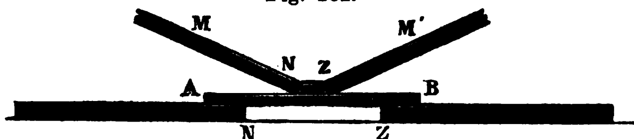
315. **Enkele streek.** — Reeds alleen door aanhoudende aanraking met eenen magneet wordt eene stalen staaf zwak magnetisch; raakt men haar eene

uiteinde bijv. aan met de noordpool van den magneet, dan vormt zich aldaar eene zuidpool. Is de staaf lang, dan kan de verdeeling van het magnetisme zeer onregelmatig zijn, zoodat er zich niet alleen polen aan de uiteinden, maar ook nog meerdere daartusschen vormen. Het is daarom verkieslijk, de staaf of naald, die men magnetisch wil maken, met een sterken magneet te wrijven, of zoo als men het noemt te *strijken*. Men beweegt eene der polen van den magneet eenige malen over de geheele lengte der staaf, zorg dragende dien altijd in dezelfde rigting te bewegen; de staaf zal dan magnetisch worden, en aan het uiteinde, waar de magneet telkens de staaf verlaat, vormt zich eene pool, tegenovergesteld aan die waarmede men haar gestreken heeft.

316. **Dubbele streek.** — Betere uitkomsten verkrijgt men, wanneer men de door Mitchell uitgedachte methode volgt. Op het midden der te magnetiseren staaf plaatst men een klein houten blokje, en aan beide zijden daarvan houdt men twee even sterke magneten met de ongelijknamige polen naar de staaf gekeerd; vervolgens strijkt men met deze beide magneten, tusschen welke het blokje steeds moet blijven, gezamenlijk van het midden naar een der uiteinden, van daar naar het andere uiteinde, en zoo heen en weêr, daarbij zorg dragende, dat iedere helft der staaf een gelijk aantal malen gestreken wordt. Het tusschenplaatsen van het blokje geschiedt alleen om te voorkomen, dat de beide magneten tegen elkander aankomen.

Men zal de staaf nog sterker magnetisch kunnen maken, wanneer men haar vooraf gelegd heeft op twee andere magneten, zoo als in fig. 282 is voorgesteld

Fig. 282.



men moet alsdan zorg dagen, dat de polen juist geplaatst zijn, zoo als aldaar is aangewezen, waar N de noordpool en Z de zuidpool aanduidt. Men moet ook in dit geval de staven M en M′ niet, zoo als bij de zoo even beschrevene methode, overeind houden, maar zoodanig, dat zij met de staaf AB hoeken van 15° tot 20° maken. Bij A zal eene zuidpool, bij B eene noordpool ontstaan. De laatstbeschrevene methode is men aan Aepinus (1758) verschuldigd.

317. **Afzonderlijke streek.** — Knight (1745) heeft nog eene andere wijze aangewezen om stalen staven te magnetiseren. Daarbij worden, even als

31

bij den dubbelen streek, twee magneten op het midden der staaf gehouden, van waar zij echter niet gezamenlijk, maar elke naar een anderen kant, tot aan de uiteinden der staaf gestreken worden. De magneet M (Fig. 282) wordt dan naar A, de magneet M′ gelijktijdig naar B bewogen. Daarbij moet men echter, even als bij den enkelen streek, zorg dragen de magneten niet aanstonds weder naar het midden der staaf terug te brengen, maar ze, als zij aan de uiteinden gekomen zijn, langs eenen omweg op eenigen afstand van de staaf, tot dat midden terugbrengen. Geschiedt deze terugkeerende beweging in te groote nabijheid van de staaf, dan wordt de uitwerking van den streek weder gedeeltelijk vernietigd.

Volgens Duhamel zal de uitkomst nog beter zijn, wanneer men, zoo als in fig. 282 is afgebeeld, de staaf op twee andere magneten laat rusten, die met hunne ongelijknamige polen naar elkander zijn gekeerd. Coulomb raadt aan, aan de beide magneten M en M′, waarmede men strijkt, in dat geval eene helling van 20° tot 30° te geven.

318. **Magnetisering door den invloed van het aard-magnetisme.** — Plaatst men eene week ijzeren staaf in de rigting van de inclinatie-naald in den magnetischen meridiaan, dan wordt zij zelve magnetisch; men kan zich door een opgehangen of op eene fijne punt geplaatst magneetnaaldje gemakkelijk overtuigen, dat de beide uiteinden dan tegenovergestelde polen verkregen hebben, en wel het bovenste eene zuidpool, het onderste eene noordpool. Verwijdert men de ijzeren staaf, dan is ook aanstonds, wegens gebrek aan coërcitief-kracht, het magnetisme daarin weder verdwenen; keert men de staaf om, dan verwisselen de polen. Geeft men met een hamer een slag op een der uiteinden in de rigting der lengte, of wordt zij in dien stand gewrongen, dan blijft zij, hoewel slechts in geringe mate, magnetisch; ook trillingen zijn zeer bevorderlijk om de coërcitief-kracht in dit geval te vermeerderen. Men ziet dus, dat door gelijktijdige werking van het aard-magnetisme en van moleculaire krachten eene ijzeren staaf magnetisch worden kan. Het is ook daaraan toe te schrijven, dat de meeste ijzeren of stalen werktuigen, waarvan zich de smeden of schrijnwerkers bedienen, doorgaans magnetisch zijn.

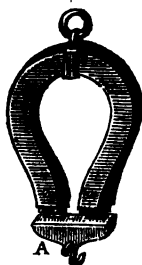
De invloed van het aard-magnetisme doet zich ook op de magneten zelven gevoelen. Plaatst men bijv. eene magneetstaaf in de rigting der inclinatie-naald, doch met de zuidpool naar beneden, dan zal men na eenigen tijd eene aanmerkelijke verzwakking bemerken. Slaat men er in dezen stand met een hamer op in de rigting der lengte, dan is het verlies nog aanzienlijker.

319. **Magneetbundels; wapening der magneten.** — Worden verscheiden magneten tot een bundel vereenigd, door namelijk de gelijknamige polen alle aan denzelfden kant te leggen, dan zal de magneetkracht van dezen bundel minder bedragen dan de som der krachten van elke staaf afzonderlijk. Dit moet daaraan worden toegeschreven, dat die staven eene magnetische werking op elkander uitoefenen, waardoor hare kracht vermindert. Coulomb heeft dit aangetoond, door te doen zien, dat staven, die eenigen tijd binnen in een bundel geweest waren, een vrij aanzienlijk gedeelte van hare magneetkracht verloren hadden.

Dezen nadeeligen invloed van de verschillende staven, die eenen bundel uitmaken, op elkander kan men grootendeels voorkomen door de staven van ongelijke lengte te maken, en vooral door aan de beide uiteinden stukken week ijzer te verbinden, aan welke men den naam van *wapening* van den magneet gegeven heeft, en die onder den invloed der magneetstaven zelven magnetisch werden.

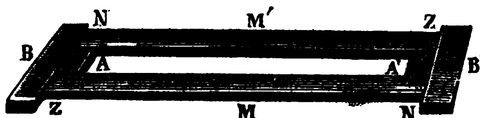
Het vermogen van een magneetbundel wordt doorgaans uitgedrukt door het gewigt, dat men er aan kan hangen, zonder dat het er afvalt; men noemt dit het draagvermogen. Men maakt dit het aanzienlijkst, wanneer men aan de staven zoodanigen vorm geeft, dat het gewigt aan beide polen te gelijk kan worden opgehangen, zooals is afgebeeld in fig. 283; deze vorm van magneet wordt een *hoef* genoemd. Men vervaardigt die doorgaans van 5 of 7 staven, die zoo op elkander gelegd worden, dat de grootste in het midden ligt en de kleinsten de uitersten zijn. Daartegen brengt men dan een stuk week ijzer, zooals bij A is voorgesteld, dat den naam van *anker* draagt, en waaraan men dan door middel van eene schaal zooveel gewigten kan ophangen als men wil.

Fig. 283.



De wapening der gewone magneetstaven, welke vooral noodig is, wanneer men ze niet gebruikt en ze gezamenlijk in een doos liggen laat, geschiedt het best op de wijze in fig. 284 aangewezen. M en M′ zijn twee magneten, die men zoodanig legt, dat de tegenovergestelde polen naar denzelfden kant gekeerd zijn. De stukjes hout A en A′ dienen alleen om eene aanraking der polen te voorkomen. Tegen de uiteinden worden twee stukken week

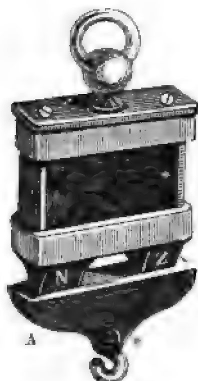
Fig. 284.



ijzer B en B′ gelegd, die door den invloed der magneten M en M′ ook magnetisch worden, en elk eene noordpool en eene zuidpool verkrijgen.

Wil men een natuurlijken magneet in staat stellen een zeker gewigt te dragen, dan moet hij ook met eene wapening voorzien worden. Men bepaalt eerst door middel van een beweegbaar magneetnaaldje de plaats der polen, en voorziet hem daarna op zoodanige wijze van week ijzeren platen, dat de beide polen zich in de nabijheid der stukken week ijzer N en Z (Fig. 285) bevinden. Aan deze wordt op gelijke wijze een anker A opgehangen, als aan een hoefmagneet.

Fig. 285.



Wil men de draagkracht van een magneet bepalen, dan moet men zorg dragen slechts weinig gewigt te gelijk aan te brengen. De ondervinding leert, dat wanneer men veel te gelijk wil ophangen, men gevaar loopt het anker af te doen vallen, waardoor de draagkracht verminderd wordt. Heeft men aan een magneet zooveel opgehangen als hij maar dragen kan, en laat men hem dan eenige dagen in dien toestand, dan zal men daarna er nog eenig gewigt bij kunnen voegen, zonder dat het anker er afvalt. De oorzaak van dit verschijnsel heeft men tot dus verre nog niet met zekerheid weten aan te wijzen.

320. **Invloed van de warmte op het magnetisme.** — Verandering der temperatuur oefent op den magneet invloed uit; door verwarming verliest hij een gedeelte van zijne kracht. Het doet er echter veel toe, of die verwarming aanzienlijk is of niet. Is zij slechts gering, dan is ook het verlies van het magnetisme gering, en de magneet keert, wanneer de temperatuur gedaald is, ook nagenoeg tot zijnen vorigen toestand terug. Men kan zich hiervan overtuigen, door een magneet in een bak met water te leggen en in de nabijheid een magneetnaaldje te plaatsen, dat door den invloed van dien magneet eene afwijking van zijne gewone rigting vertoont. Verwarmt men nu het water, dan zal men bemerken, dat ook de invloed van den magneet langzamerhand afneemt. Laat men het water bekoelen, dan keert ook het naaldje weder tot zijn oorspronkelijken stand terug. Is de verwarming aanzienlijker, dan is ook het verlies aan magneetkracht grooter. Heeft men den magneet gloeijend gemaakt, dan keert de magneetkracht in het geheel niet terug.

Uit onderzoekingen van Pouillet is gebleken, dat week ijzer, als het gloeiend gemaakt wordt, niet meer door een magneet wordt aangetrokken. Bij

de meeste andere metalen, zooals kobalt, nikkel en anderen, welke, zooals wij gezien hebben (301), ook tot de magnetische behooren, wordt hetzelfde waargenomen; sommige verliezen de eigenschap om aangetrokken te worden reeds voor dat zij gloeijend worden, zooals nikkel en mangaan; kobalt daarentegen is nog magnetisch als het wit gloeijend is.

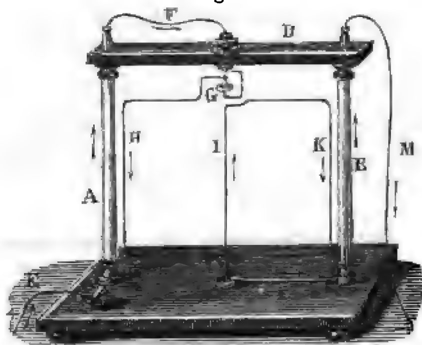
D. WERKING VAN ELECTRISCHE STROOMEN OP ELKANDER EN OP MAGNETEN. ELECTRO-MAGNETISME.

321. **Electro-dynamica.** — Ampère (1820) is de eerste geweest, die heeft aangetoond, dat electrische stroomen eene werking op elkander uitoefenen; omstreeks denzelfden tijd ontdekte Oersted, dat een electrische stroom ook op de magneetnaald invloed uitoefent. Van deze verschijnselen, die doorgaans onder den naam van *electro-dynamica* zamengevat worden, heeft Ampère eenige jaren later (1826) eene algemeene theoric gegeven, die wij echter hier niet geheel kunnen opnemen; wij zullen ons bepalen tot eene aanwijzing en verklaring van de verschijnselen, welke het meest geschikt zijn om van het geheel een juist denkbeeld te geven.

Tot opheldering zij vooraf nog opgemerkt, dat men zich tot geleiders der stroomen doorgaans van koperdraden bedient; laat men door een regtlijnigen of gebogenen koperdraad een stroom gaan, dan noemt men dien stroom ook regtlijnig of gebogen, naar den vorm dien men aan het koperdraad gegeven heeft.

322. **Werking van evenwijdige stroomen op elkander.** — De werking van evenwijdige stroomen op elkander wordt het gemakkelijkst aangetoond door den in fig. 286 afgebeelden toestel. A en B zijn twee koperen kolommen, die op een houten, dus niet geleidenden voet C bevestigd en door een houten bovenstuk D vereenigd zijn. De kolom A is door middel van den koperdraad E in verbinding met de positieve pool eener galvanische batterij van 3 of 4 Bunsen'sche elementen. Boven aan die

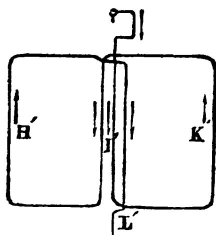
Fig. 286.



kolom bevindt zich een koperdraad F, die door het midden van het houten bovenstuk D gaat en bij G eindigt in een koperen bakje, waarin men kwikzilver schenkt. In dat bakje rust het uiteinde van den meermalen regthoekig omgebogen koperdraad HIK, wiens andere uiteinde L rust in een kwikbakje in den houten voet, dat door eene kopergeleiding in verbinding is met de kolom B. De koperdraad M, aan het andere uiteinde dezer kolom bevestigd, wordt met de negatieve pool der batterij verbonden. Men zal inzien, dat de stroom (wanneer wij van stroom spreken, bedoelen wij den positieven) door dit geheele stelsel gaat in de door de pijltjes aangewezene rigting. De stroom, die door A en B gaat, is dus evenwijdig aan dien, welke door H en K gaat, maar juist tegenovergesteld. Men zal bevinden, dat wanneer men de draadgeleiding in den door de figuur aangewezen stand plaatst, deze om de beide steunpunten G en L zal beginnen te draaijen, tot dat zij een stand heeft aangenomen, welke met den oorspronkelijken eenen regten hoek maakt. Daaruit volgt dus, dat twee evenwijdige stroomen van tegenovergestelde rigting elkander afstooten.

Vervangt men de draadgeleiding HIK door de in fig. 287 afgebeelde I'K'H', dan zal men, door eenvoudig het koperdraad te volgen, zich kunnen overtuigen, dat, terwijl de stroom in A en B dezelfde blijft als in fig. 286, die in de draadgeleiding van rigting verandert, zoodat de stroom in A en B niet alleen evenwijdig is aan dien in H' en K', maar bovendien ook dezelfde rigting heeft. Brengt men nu de draden D en M in verbinding met de polen, dan zal men bevinden, dat wanneer men de draadgeleiding buiten het vlak, dat door A en B gaat, geplaatst heeft, zij van zelve eene draaijende beweging aanneemt, totdat zij zich in hetzelfde vlak bevindt. Daaruit mag men dus besluiten, dat twee evenwijdige en gelijk gerigte stroomen elkander aantrekken.

Fig. 287.



Zullen deze proeven goed gelukken, dan moet men zorgen, dat er in de punten G en L eene goede verbinding plaats heeft; te dien einde is het noodig, dat de uiteinden der koperdraden steeds goed worden afgeschuurd, alvorens men ze in het kwikzilver dompélt.

323. Onderlinge werking van stroomen, die een hoek met elkander maken. — Om de werking van niet evenwijdige stroomen aan te toonen kan men gebruik maken van den in fig. 288 voorgestelden toestel. De positieve pooldraad eener batterij wordt bevestigd in A; de stroom volgt

de koperen kolom B en den horizontalen koperen arm C, treedt bij het kwikbakje D in de draadgeleiding EFG, en bij H in de koperen kolom IK;

Fig. 288.

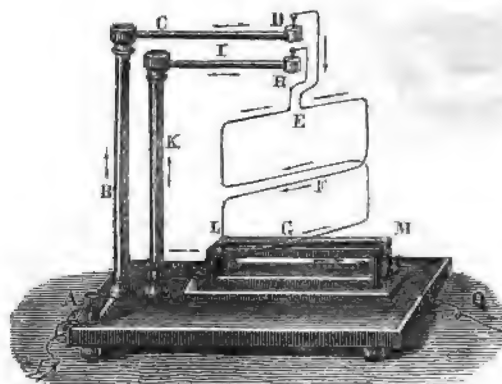
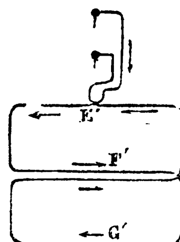


Fig. 289.



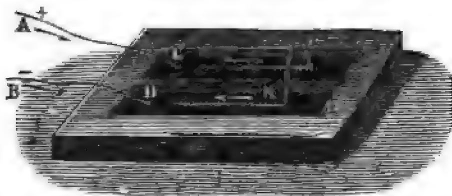
van deze begeeft hij zich in een koperdraad LM, die eenige malen om het houten raam OP gewonden is, en bij Q met den negatieven pooldraad der batterij verbonden is. De pijltjes in de figuur wijzen de rigting van den stroom aan; die in G en in LM maken een hoek met elkander; zoodra de stroom door de geleiding gaat, ziet men dien hoek kleiner worden, totdat ten laatste G evenwijdig met LM wordt. Verwisselt men de pooldraden bij A en Q, dan zullen alle stroomen eene tegenovergestelde rigting aannemen; het verschijnsel zal nogtans hetzelfde zijn. Daaruit blijkt, dat twee stroomen, die eenen hoek met elkander maken, elkander aantrekken, wanneer zij beide naar het hoekpunt of beide van uit het hoekpunt gerigt zijn.

Vervangt men de draadgeleiding EFG door de in fig. 289 afgebeelde E'F'G', en plaatst men deze zoodanig, dat G' weder eenen hoek van 15° of 20° met LM maakt, dan zal, zoodra de stroom door den toestel gaat, de hoek grooter worden. Daar in dit geval de eene stroom naar het hoekpunt gerigt is, doch de andere zich van dat punt verwijdert, zoo volgt hieruit, dat twee stroomen, die een hoek met elkander maken, elkander afstooten, wanneer de eene zich van het hoekpunt verwijdert, terwijl de andere naar het hoekpunt gerigt is.

324. **Werking van twee gedeelten van een zelfden stroom op elkander.** — In een houten blokje (Fig 290) worden

twee gootjes gemaakt, waarin men kwikzilver schenkt. Bij C wordt de positieve, bij D de negatieve pooldraad in het kwikzilver gebragt. Een met zijde omwonden koperdraad van den in de figuur aangewezen vorm GH wordt op het kwikzilver gelegd, en wel in dier voege, dat de uiteinden, die niet met zijde omwonden mogen zijn, zich in de nabijheid van C en D bevinden. Zoodra de stroom door dezen toestel gaat, begint het koperdraad GH zich te bewegen naar den kant EF. Men leidt hieruit af, dat de twee opeenvolgende gedeelten van een zelfden stroom elkander afstooten.

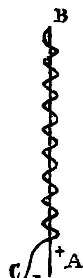
Fig. 290.



Nogtans mag men bij deze proef niet uit het oog verliezen, dat de beweging ook veroorzaakt kan worden door den tegenstand, dien de stroom ondervindt bij den overgang van het kwikzilver in het koper bij C en van het koper in het kwikzilver bij D. Dit neemt echter niet weg, dat de eigenschap zelve als bewezen mag worden aangenomen, daar Ampère haar bovendien heeft afgeleid uit de eigenschappen der niet evenwijdige stroomen (323).

325. **Werking van gebogene stroomen.** — Door een gebogen stroom verstaat men meer bijzonder een zoodanigen, die gaat door een spiraalvormig gebogen koperdraad. Is deze zoodanig ingerigt, dat de afstand tusschen twee achtervolgende omwindingen zeer groot is in vergelijking van de dikte van den draad, dan is de werking dezelfde, als die van eenen regtlijnigen stroom. Men kan zich daarvan gemakkelijk proefondervindelijk overtuigen. Werken er twee even sterke stroomen in tegenovergestelde rigting, de een AB door een regten, de andere BC door een gebogen draad, zoo als bij den in fig. 291 afgebeelden koperdraad, dan zal men bemerken, dat deze stroomen op een daarnaast geplaatsten beweegbaren stroom, zooals HIK in fig. 286, geene werking uitoefenen, hetgeen daaraan moet worden toegeschreven, dat de beide in tegenovergestelde rigting werkende stroomen elk eene tegenovergestelde werking op den daarnaast geplaatsten beweegbaren stroom uitoefenen.

Fig. 291.



326. **Toepassing van de voorgaande wetten op stroomen, die loodregt op elkander gerigt zijn.** — Past men

de zoo even aangetoonde wetten toe op twee stroomen, wier rigtingen eenen regten hoek met elkander maken, zooals AB en CD in fig. 292, en kan de stroom CD zich evenwijdig aan zich zelf verplaatsen, dan zullen, wanneer de pijltjes de rigting der stroomen aanwijzen, de stroomen CD en EB, zich beide van het hoekpunt E verwijderende, elkander aantrekken, terwijl daarentegen CD en AE elkander afstooten; het gevolg hiervan zal dus zijn, dat de beweegbare stroom zich evenwijdig aan zich zelf moet verplaatsen in de rigting van den stroom AB. Is daarentegen de rigting der stroomen zooals in fig. 293 is voorgesteld, zoodat de beweegbare stroom CD naar den vasten stroom AB gerigt is, dan trekken AE en CD elkander aan, terwijl EB en CD elkander afstooten; in dit geval zal zich de stroom CD dus bewegen in eene rigting tegenovergesteld aan die van den stroom AB.

Fig. 292.

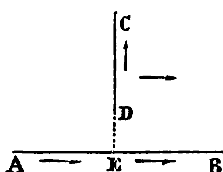
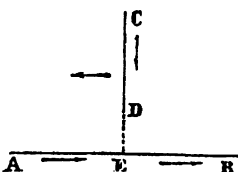


Fig. 293.



Kan de stroom om een zijner uiteinden draaijen, zoo als in fig. 294, waar wij onderstellen dat de stroom CD geene andere beweging dan om C kan aannemen, dan zal er, om gelijke redenen als zoo even is aangetoond, eene aantrekking tusschen AE en CD plaats hebben en eene afstooting tusschen CD en EB; de stroom CD zal zich dus linksom om het punt C bewegen, tot hij in den stand CD′ is gekomen; alsdan is hij evenwijdig aan AB, doch in rigting tegenovergesteld, zoodat er afstooting moet plaats hebben; de draaijende beweging van C gaat dus voort, tot de stroom den stand CD″ aanneemt. In dien stand moet er aantrekking tusschen CD″ en EB plaats hebben, waardoor de stroom geraakt in den stand CD‴, in welken eindelijk weder aantrekking tusschen dezen en EB moet worden waargenomen, als zijnde deze beide stroomen evenwijdig en gelijk gerigt. In het geval, voorgesteld in fig. 295, moet eene draaijing in tegenovergestelde rigting plaats vinden, zooals aanstonds blijkt, wanneer men de voorgaande redenering op

Fig. 294.

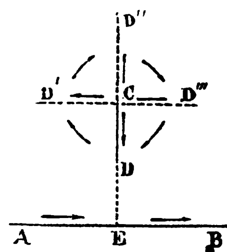
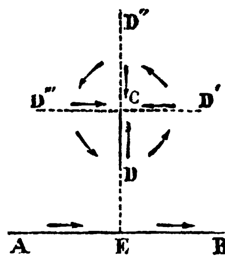


Fig. 295.



dat geval toepast. Daaruit volgt, dat wanneer een stroom, die om een zijner uiteinden draaijen kan, zich bevindt in de nabijheid van een onbegrensden stroom, waarop hij loodregt gerigt is, die draaijing zal plaats hebben in eene rigting, tegenovergesteld aan die van dien stroom, wanneer de beweegbare stroom zich van het vaste punt verwijdert, doch in dezelfde rigting, wanneer de beweegbare stroom naar het vaste punt gerigt is. Deze eigenschappen kunnen proefondervindelijk aangetoond worden door toestellen, waarvan de beschrijving hier kortheidshalve wordt achterwege gelaten, daar toch de juistheid dier wet uit de bovenstaande redenering genoegzaam blijkt.

327. **Werking van een onbegrensden regtlijnigen op een gesloten beweegbaren stroom.** — Zij AB (Fig. 296) een onbegrensde regtlijnige stroom, van A naar B gerigt, en CDEFGHIK een gesloten beweegbare stroom, die om de punten C en K, dus om eene as KL, welke

Fig. 296.

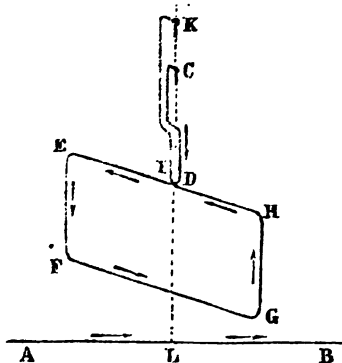
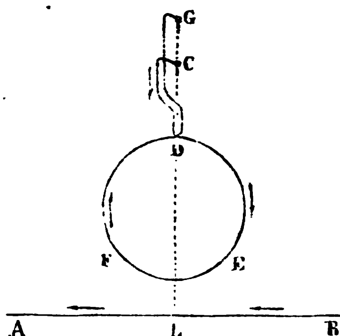


Fig. 297.



loodregt op AB gerigt is, kan draaijen. De pijltjes wijzen de rigting van den stroom aan; hierbij is echter nog op te merken, dat de twee draden, die bij D en I elkander kruisen, even als die in fig. 289, volkomen van elkander geïsoleerd behooren te zijn; dit geschiedt het gemakkelijkst door ze met zijde te omwinden. Maakt nu het vlak van den gesloten stroom eenen hoek met het vertikale vlak, dat door AB gaat, dan zullen de stroomen EF en GH, waarvan de eerste zich achter, de laatste zich voor dat vlak bevindt, door den stroom AB worden aangetrokken; ook de stroomen AB en FG trekken elkander aan, terwijl alleen AB en EH elkander afstooten; de kracht, die den ge-

sloten stroom noopt om zich in het vertikale vlak van AB te plaatsen, is dus veel aanzienlijker dan die, welke hem daarvan verwijdert, en het gevolg moet dus zijn, dat de gesloten stroom gerigt wordt volgens AB. Voor een cirkelvormigen gesloten stroom, zooals CDEFG in fig. 297, geldt volkomen dezelfde redenering, zoodat ook deze zich zoodanig zal plaatsen, als in de figuur is aangewezen. Men zal inzien, dat dit zich gemakkelijk laat aantoonen met behulp van den in fig. 288 afgebeelden toestel, waaraan men de verschillende draadgeleidingen kan ophangen.

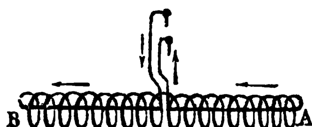
328. **Werking van regtlijnige stroomen op solenoïden, en van de laatstgenoemden onderling.** — Door *solenoïde* verstaat men een stelsel van geslotene gelijke en cirkelvormige stroomen, die alle dezelfde rigting hebben, en waarvan de middenpunten zich alle bevinden op eene lijn, waarop hunne vlakken loodregt staan. Zoodanige solenoïde verkrijgt men, wanneer een met zijde omwonden koperdraad wordt gebogen op de in fig. 298 aangeduide wijze. Treedt hier een stroom bij A in, dan ontstaan er eene menigte cirkelvormige stroomen en tevens een stroom van A naar B door de gedeelten, die de achtervolgende cirkelvormige gedeelten onderling verbinden, alsmede een stroom van B naar C door den regtlijnigen draad, die midden door de ringen gaat. Daar deze twee laatste stroomen, als gelijk en tegenovergesteld, elkander vernietigen, blijven er dus in dit stelsel slechts evenveel cirkelvormige stroomen over, als er ringen zijn.

Fig. 298.



De werking van stroomen op solenoïden laat zich uit de voorgaande eigenschappen gemakkelijk afleiden, daar de rigtende werking van een vasten regtlijnigen stroom op een gesloten en beweegbaren cirkelvormigen ook op deze van toepassing moet zijn. Laat men dus door eene solenoïde van den in fig. 299 aangewezen vorm een stroom gaan, en hangt men haar op boven eenen horizontalen regtlijnigen stroom, dan zal de solenoïde zich zoo moeten plaatsen, dat de as AB een regten hoek maakt met de rigting van dien stroom, omdat in dezen stand de ringen zich bevinden in vlakken, zamenvallende met of evenwijdig aan het vertikale vlak, dat door den vasten stroom gaat; bovendien moet de stand zoodanig zijn, dat de rigting der stroomen in het onderste gedeelte der ringen dezelfde is als die van den horizontalen stroom (327).

Fig. 299.



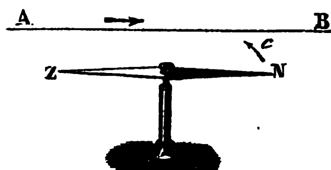
Bevindt zich de vaste stroom in eenen vertikalen stand, dan kan men het beschouwen, alsof de stroomen in de ringen daarmede evenwijdig loopen. Volgens de wetten der evenwijdige stroomen (322) zal er dus aantrekking of afstooting plaats moeten hebben, naar gelang de vertikale stroom dezelfde of eene tegenovergestelde rigting heeft, als die in het naar hem toegekeerde gedeelte der solenoïde.

Beide eigenschappen laten zich ook weder zeer gemakkelijk aantoonen door de solenoïden op te hangen aan den in fig. 288 beschreven toestel, en denzelfden stroom hetzij door een horizontalen, hetzij door een vertikalen geleiddraad te doen gaan.

Laat men twee solenoïden op elkander werken, door de eene aan den toestel van fig. 288 op te hangen, en de andere, waardoor eveneens een stroom gaat, daarbij te houden, dan bevindt men, dat zij steeds zoodanigen stand ten opzigte van elkander trachten aan te nemen, dat de cirkelvormige stroomen van de opgehangen solenoïde evenwijdig loopen aan die van den anderen, en bovendien daarmede gelijk gerigt zijn. Dit moet dus ten gevolge hebben, dat het alleen van den betrekkelijken stand der twee solenoïden zal afhangen, of zij elkander aantrekken of afstooten.

329. **Werking van stroomen op magneten.** — Plaatst men een geleiddraad AB (Fig. 300), waardoor een electrische stroom gaat, in horizontalen stand en zoodanig, dat hij zich in het vlak van den magnetischen meridiaan bevindt, en dat de stroom van het zuiden naar het noorden gerigt is, zooals het pijltje aanduidt; plaatst men voorts daar onder eene beweegbare magneetnaald ZN, dan zal de naald evenwijdig zijn met den draad AB, zoolang de stroom daar niet door heen gaat. Wordt echter de draad in verbinding gebragt met eene galvanische keten, dan zal men aan de naald terstond eene afwijking waarnemen, die des te aanzienlijker zijn zal, naarmate de stroom sterker is.

Fig. 300.

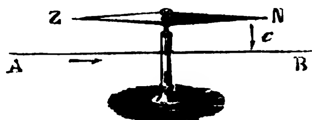


Om den kant te vinden, naar welken de noordpool der naald afwijkt, kan men den volgenden regel gebruiken. Men stelt zich voor, dat men in den draad zoodanig geplaatst is, dat de stroom bij de voeten binnenkomt en bij het hoofd uitgaat, en dat men het aangezigt naar den naald gekeerd heeft; de noordpool der naald zal dan naar den linkerkant afwijken. In onze afbeelding zal dus de noordpool N in de rigting van het pijltje *c* afwijken, en moet de naald,

zoolang de stroom duurt, eenen stand aannemen, waarin zij met AB eenen grooteren of kleineren hoek maakt. Gaat de stroom in eene tegenovergestelde rigting, dan moet men zich verbeelden, dat de voeten bij B en het hoofd bij A geplaatst zijn; de magneetnaald zal dan, volgens den opgegeven regel, in de tegenoverstelde rigting afwijken.

Gaat de stroom niet boven maar onder de naald door, en in de rigting van het zuiden naar het noorden, zooals in fig. 301, dan zal volgens denzelfden regel de afwijking moeten plaats hebben volgens de rigting van het pijltje *c*. Wordt de stroom omgekeerd, dan zal ook de afwijking van de noordpool N in eene tegenovergestelde rigting plaats hebben.

Fig. 301.



Deze belangrijke eigenschap is het eerst in 1819 ontdekt door Oersted; den opgegevenen regel, om steeds de rigting der afwijking te vinden, is men aan Ampère verschuldigd.

330. **Overeenkomst tusschen magneten en solenoïden; theorie van Ampère aangaande het magnetisme.** — Vergelijkt men de werking van den stroom op eene magneetnaald met zijne hiervóór (328) vermelde werking op eene solenoïde, dan bemerkt men overeenkomst tusschen de beide verschijnselen. De solenoïde toch wijkt af van de rigting van den stroom, en plaatst zich zoodanig, dat hare as loodregt staat op de rigting van den horizontalen stroom; hetzelfde zoude ook de magneetnaald doen, wanneer daarop niet tevens het aard-magnetisme werkte.

Wij hebben eveneens gezien, dat wanneer men het uiteinde eener solenoïde in de nabijheid van eene andere beweegbare solenoïde brengt, er aantrekking of afstooting tusschen die beide wordt waargenomen, naar gelang van de rigting van den stroom in die solenoïden. Is die in beide dezelfde, dan stooten zij elkander af; is zij ongelijk, dan heeft er aantrekking plaats. Dit komt geheel overeen met hetgeen bij de onderlinge werking van magneten wordt waargenomen, wier gelijknamige polen elkander afstooten, terwijl de ongelijknamige elkander aantrekken.

Brengt men een magneet bij eene vrij opgehangene solenoïde, dan wordt er eveneens onderlinge werking waargenomen; de noordpool van den magneet stoot het eene uiteinde van de solenoïde af, terwijl zij het andere aantrekt.

Wordt eene solenoïde geheel vrij opgehangen, dan zal de aarde invloed op haar uitoefenen, even als op eene magneetnaald; de solenoïde zal zoo lang om

haar ophangpunt draaijen, tot hare as zich in het vlak van den magnetischen meridiaan bevindt. Het naar het noorden gekeerde uiteinde is hetzelfde, dat door de noordpool van den magneet werd afgestooten.

Uit deze waarnemingen mag men dus afleiden, dat eene solenoïde dezelfde verschijnselen vertoont als een magneet. Dit heeft Ampère aanleiding gegeven om eene andere theorie voor het magnetisme uit te denken dan die, welke wij hiervoor (301) hebben gegeven. Hij onderstelt namelijk, dat de verschijnselen in de magneten veroorzaakt worden door dergelijke cirkelvormige electrische stroomen, als wij in de solenoïden waarnemen. Die stroomen zouden volgens hem bestaan rondom de moleculen van alle stoffen, waarop een magneet op de eene of andere wijze invloed uitoefent. Verkeert een magnetisch ligchaam in den neutralen toestand, dan is de rigting der stroomen in de onderscheidene moleculen zeer verschillend, doch zoo, dat zij elkander neutraliseren, en dus geene werking naar buiten uitoefenen. Bij een magneet daarentegen, onverschillig of hij blijvend of slechts tijdelijk magnetisch is, bewegen zich die stroomen allen in dezelfde rigting en in onderling evenwijdige vlakken, zoodat hunne werking kan worden voorgesteld als veroorzaakt door een enkelen stroom, die dan de resultante van al die kleine stroomen is en werkt in een vlak, loodregt op de as van den magneet. De overeenkomst tusschen een magneet en eene solenoïde zoude dus volkomen zijn, zoo zij geen verschil opleverden, wat de plaats der polen aangaat, die bij de solenoïden wel, doch bij de magneten niet aan de uiteinden gelegen zijn. Ampère schrijft dit eenvoudig daaraan toe, dat bij de magneten de naast elkander gelegene stroomen op elkander werken, waardoor de vlakken, waarin die stroomen werken, niet evenwijdig blijven, terwijl bij de solenoïden die evenwijdigheid een onmisbaar gevolg van de zamenstelling zelve moet zijn.

331. **Werking van een magneet op een beweegbaren stroom.** — Wij hebben gezien (329), dat een electrische stroom op een beweegbaren magneet eene rigtende kracht uitoefent; ook omgekeerd zal een magneet eene dergelijke werking op een beweegbaren stroom moeten uitoefenen.

Men kan zich daarvan gemakkelijk overtuigen met behulp van den in fig. 288 afgebeelden toestel, waarvan men echter het gedeelte LM heeft weggelaten. Laat men den stroom door de draadgeleiding gaan, en houdt men een magneet in het onderste gedeelte daarvan, tusschen F en G, dan zal de koperdraad zoo lang draaijen, tot hij zich bevindt in een vlak loodregt op de as van den magneet.

Ook op een niet gesloten stroom, hetzij die vertikaal of horizontaal is,

oefent een magneet invloed uit; wij zullen echter die verschillende gevallen hier niet beschouwen, die praktisch van minder belang zijn en allen hare verklaring vinden in de daarvoor ontwikkelde theorie van Ampère.

332. **Werking van het aard-magnetisme op beweegbare stroomen.** — Van meer belang mag het geacht worden de werking van het aard-magnetisme op de electrische stroomen na te gaan, omdat deze over den aard dier kracht meer licht kan verspreiden.

Om den invloed van het aard-magnetisme op een vertikalen stroom aan te toonen bedient men zich van den toestel, in fig. 302 afgebeeld. Deze bestaat

Fig. 302.

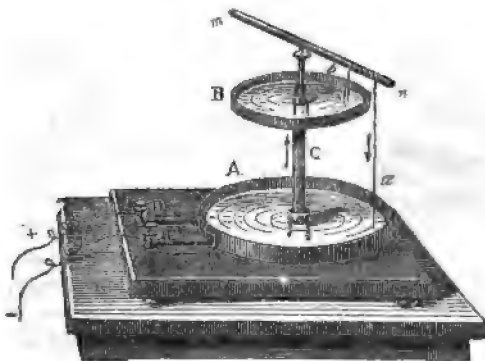
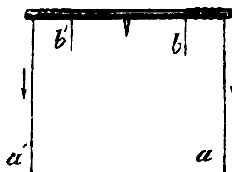


Fig. 303.



uit twee koperen bakken A en B, met zeer verdund zuur gevuld, en door eene koperen kolom C vereenigd, die echter in eene glazen buis ingesloten is, zoodat zij van den ondersten bak A geïsoleerd is; met den bovensten daarentegen moet zij in geleidende verbinding staan. Boven op de kolom C rust een ligt houten staafje *mn*, om welks eene uiteinde een koper- of platinadraad gewonden is, zoodanig, dat het eene uiteinde *a* in den bak A, het andere *b* in den bak B uitkomt. Het knopje D is door eene metalen reep met de kolom C, het knopje E met den bak A verbonden. Worden nu de pooldraden eener batterij in die knopjes gestoken, dan zal de positieve stroom bij D binnenkomen, vervolgens door de kolom zich naar den bovensten bak B begeven, en van daar door de geleidende vloeistof en den koperdraad *ba* naar den ondersten bak A. Tengevolge van de werking van dezen stroom ziet

men het houtjen staafje *mn* eene draaijende beweging aannemen, tot dat het uiteinde, waaraan de koperdraad bevestigd is, naar het oosten gekeerd is. Keert men den stroom om, door de pooldraden te verwisselen, dan zal daarentegen het beweegbare gedeelte zich zoodanig plaatsen, dat hetzelfde uiteinde naar het westen gekeerd is.

Vervangt men het beweegbare gedeelte door het in fig. 303 afgebeelde, dat met twee van elkander onafhankelijke metaaldraden voorzien is, dan zal men geene werking waarnemen; dit komt daarvan, dat *ab* en *a'b'* zich beiden steeds aan denzelfden kant van de kolom C trachten te plaatsen.

De werking der aarde op een horizontalen stroom toont men aan door middel van den in fig. 304 afgebeelden toestel, die bestaat uit een met verdund zuur gevulden bak A, in het midden waarvan zich een van dien bak geïsoleerd kolommetje B bevindt; op dit kolommetje rust op eene metalen punt, die in een kwikbakje gedompeld is, de koperdraad *mn*, waarvan de uiteinden door de draden *a* en *b* met de vloeistof in verbinding zijn. Het knopje C staat in verband met de kolom B, het knopje D met den bak A. De stroom, die bij C binnen komt, gaat dus door het kolommetje naar boven, en vervolgens aan weêrszijden door de draden *m* en *n* en door *a* en *b* naar de vloeistof. Door de werking van het aard-magnetisme zal nu de geheele beweegbare toestel ronddraaijen, en wel in de rigting van het pijltje *c*. Verwisselt men de polen, zoodat de stroom zich niet van het kolommetje verwijdert, maar integendeel daar heen gerigt is, dan heeft de omdraaijing in tegenovergestelde rigting plaats. Deze werking kan niet worden toegeschreven aan de vertikale gedeelten *a* en *b*, daar uit de proef met den in fig. 303 afgebeelden toestel gebleken is, dat het aard-magnetisme op twee zulke stroomen geen invloed uitoefent.

Fig. 304.

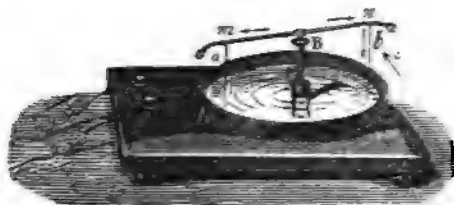
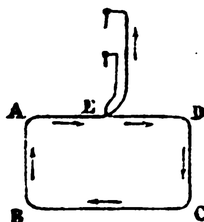


Fig. 305.

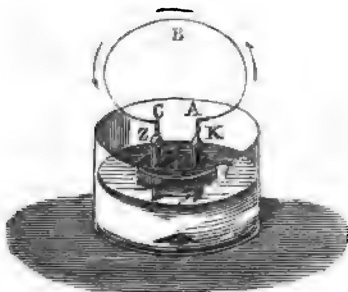


Daar een gesloten stroom kan beschouwd worden als bestaande uit vertikale en horizontale gedeelten, kan men uit het voorgaande zonder moeite afleiden, welke werking het aard-magnetisme daarop moet uitoefenen. Hebben wij bijv. eenen regthoekigen stroom van den vorm

ABCDE (Fig. 305), en duiden de pijltjes de rigting aan, dan hebben wij hier twee horizontale en twee vertikale stroomen. De beide eerste, die eene tegenovergestelde rigting hebben, neutraliseren elkander; de vertikale stroom BA zal zich naar het westen rigten, en de stroom DC naar het oosten. De geheele toestel zal zich dus in een vlak plaatsen, loodregt op den magnetischen meridiaan. Keert men den stroom om, dan zal de draadgeleiding zich ook juist 180° verplaatsen.

Vervangt men den regthoekigen stroom door een cirkelvormigen, zoo als die van fig. 297, dan zal men hetzelfde waarnemen. Maakt men daarentegen gebruik van eene draadgeleiding, zoo als de in fig. 288 afgebeelde, dan zal men bemerken, dat deze zich niet rigt. Gaat men na, welke rigting de stroom in de verschillende deelen heeft, dan blijkt het aanstonds, dat hier geene rigtende kracht hare werking kan uitoefenen, daar alle werkingen elkander neutraliseren. Het is juist om die reden, dat men bij proeven, zoo als die, welke in fig. 288 is voorgesteld, zich bedient van zoodanige toestellen, waarop het aard-magnetisme geen invloed kan uitoefenen. De werking van het aardmagnetisme op gesloten stroomen kan men zeer duidelijk maken door den eenvoudigen door de la Rive uitgedachten toestel, waarvan fig. 306 eene afbeelding is. In een bak met verdund zuur plaatst men een stuk kurk, waardoor men een stuk zink Z en een stuk koper K gestoken heeft; de beide uiteinden dezer metalen zijn door een koperdraad ABC verbonden. Door de werking van het zuur op het zink ontstaat een stroom in de rigting van de pijltjes in de figuur; het aard-magnetisme oefent op de rigting van den stroom invloed uit, en zal dientengevolge den toestel zoo lang doen draaijen, tot hij zich plaatst in zoodanigen stand, dat het vlak ABC loodregt staat op den magnetischen meridiaan, en dat zich het zink oostelijk, het koper westelijk bevindt.

Fig. 306.



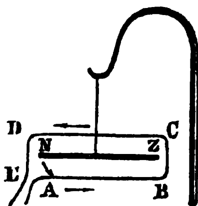
Brengt men de voorgaande verschijnselen in verband met de theorie, door Ampère voor het magnetisme gegeven, dan volgt er uit, dat men als oorzaak van het aard-magnetisme electrische stroomen moet aannemen, die onophoudelijk aan of onder de oppervlakte van den aardbol werken, in de rigting van het oosten naar het westen en loodregt op den magnetischen meridiaan. Men zal

inzien, dat zoodanige stroomen op eene vrij opgehangen magneetnaald juist dezelfde werking moeten uitoefenen, als die, welke wij hiervóór bij zoodanige naald hebben waargenomen en toegeschreven aan de toen nog in haren aard ons onbekende kracht, welke wij aard-magnetisme genoemd hebben. Het is ook niet onwaarschijnlijk, dat de magnetische toestand van sommige mineralen en ertsen alleen moet worden toegeschreven aan de aanhoudende werking dier aard-stroomen.

333. **Galvanometer.** De hiervóór beschrevene werking van een electrischen stroom op een magneet, geeft ons een geschikt middel aan de hand om de sterkte en aard van zoodanige stroomen te bepalen. Men heeft daarvan dan ook gebruik gemaakt bij den door Schweigger (1820) uitgedachten *galvanometer*, waarvan wij vroeger (271) reeds met een woord melding hebben gemaakt, doch dien wij niet konden beschrijven, zonder eerst het verschijnsel te hebben leeren kennen, waarop zijne werking berust. Wij kunnen thans tot de beschrijving van dezen en andere tot hetzelfde doel gebruikte en op hetzelfde beginsel berustende toestellen overgaan.

Stellen wij, dat eene magneetnaald NZ (Fig. 307) aan een draad wordt opgehangen, dan zal zij zich in de rigting van den magnetischen meridiaan plaatsen. Laat men nu om die naald door den koperdraad ABCD een stroom gaan in de rigting van de pijltjes, dan zal zoowel de stroom AB als de stroom CD den noordpool N naar voren doen afwijken in de rigting van het pijltje; ook in de vertikale deelen BC en DE van den stroom zal de werking volkomen dezelfde wezen. Is de draad verscheidene malen om de naald gebogen, doch zoodanig, dat elk gedeelte van het daarnaast liggende geïsoleerd is, dan zal de werking vermeerderd worden en dus de afwijking van de naald nog aanzienlijker zijn. Was het niet het geval, dat de meerdere wederstand, dien de stroom in een langeren draad ondervindt, hem een gedeelte van zijne sterkte of intensiteit doet verliezen, dan zoude men aldus de werking als 't ware tot in het oneindige kunnen doen aangroeijen. Men ziet dus, dat men in de magneetnaald een eenvoudig middel bezit om niet alleen de aanwezigheid van een electrischen stroom, maar ook zijne rigting te ontdekken.

Fig. 307.



Het is bij deze inrigting de aard-magneetkracht, die tracht de naald in den magnetischen meridiaan te doen blijven; kan men den invloed dezer kracht verminderen, dan zal de afwijking door de werking van den stroom nog aanzienlijker zijn.

Te dien einde bedient men zich niet van eene enkele magneetnaald, maar van een zoogenaamd *astatisch* naaldstelsel, zooals in fig. 308 is afgebeeld. Dit bestaat uit twee magneetnaalden NZ en N'Z', die nagenoeg gelijke magneetkracht bezitten en zoodanig onderling verbonden zijn, dat zij evenwijdig, maar in rigting tegenovergesteld zijn, zoodat de zuidpool van de eene naald zich boven de noordpool van de andere bevindt. Waren zij beide van dezelfde sterkte, dan zoude de aarde geen rigtenden invloed er op kunnen uitoefenen; bestaat er daarentegen een gering verschil in sterkte, dan zal de rigting dezelfde zijn als die der sterkste naald, wanneer zij alleen opgehangen was, maar de rigtende kracht zal veel geringer en slechts gelijk aan het verschil van die beide zijn. Laat men nu om de onderste naald van zoodanig stelsel een stroom ABCD gaan, dan zal de werking dezelfde zijn als bij eene enkele naald. Op de onderste naald is de werking volkomen dezelfde als op de enkele naald in fig. 307; de bovenste tracht door de werking van het stroomgedeelte AB in tegenovergestelde rigting af te wijken, terwijl daarentegen CD eene afwijking in dezelfde rigting moet veroorzaken, volgens welke ook de onderste naald NZ afwijkt. Daar het stroomgedeelte CD veel digter bij de naald N'Z' geplaatst is, zal echter zijne werking de overhand behouden, zoodat de stroom ook N'Z' in dezelfde rigting doet afwijken als NZ. Men ziet dus, dat door deze inrigting de werking van den stroom toeneemt, terwijl de invloed van de aarde vermindert, en dat de gevoeligheid van den toestel dus veel aanzienlijker moet zijn.

Fig. 308.

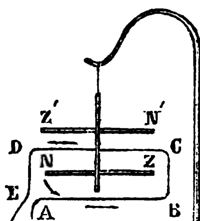


Fig. 309.



Men geeft aan den galvanometer of *multiplicator* (welke naam afkomstig is van de vermeerdering der werking door den herhaaldelijk om de naald gebogen koperdraad) doorgaans de inrigting van R in fig. 162 of wel die van fig. 309. Om een houten klosje is een zeer lange met zijde omwonden koperdraad gewonden, waarvan het eene uiteinde in verbinding staat met koperen knopje A, het andere met het knopje B. Binnen in de houten klos kan zich de onderste naald

van het bij C aan een enkel zijden draadje opgehangen astatische naaldstelsel vrij bewegen, terwijl de bovenste naald NZ boven een verdeelden cirkel uitkomt. Bovenaan bij D bevindt zich een schroefje, waarmede men de naald hooger en lager kan hangen; gebruikt men den galvanometer niet, dan laat men de naald bij voorkeur rusten op den verdeelden cirkel. Wil men hem gebruiken om eenen electrischen stroom te onderzoeken, dan begint men met, door middel van het schroefje D, de naald op te ligten, tot zij zich vrij rigten kan. Is zij tot rust gekomen, dan draait men de houten klos met de draadomwindingen en den verdeelden cirkel door middel van een daartoe aanwezigen knop zoo lang om, totdat de rigting der draden dezelfde is als die der naald, en deze juist op het nulpunt van de verdeeling wijst. Bevestigt men nu in de knopjes A en B de pooldraden van een galvanisch element, dan zal de stroom door de geheele draadomwinding gaan en dus de naald doen afwijken.

Het getal der draadomwindingen hangt af van het doel, waartoe men den galvanometer gebruikt. Voor zeer sterke stroomen zijn weinige omwindingen voldoende. Voor de zoogenaamde thermo-electrische stroomen, waarvan wij later de eigenschappen zullen vermelden, doch waarvan wij de toepassing reeds hebben gegeven bij den thermo-multiplicator (156), gebruikt men een dunnen draad, die 200 tot 300 maal om de klos gewonden wordt. Voor sommige onderzoekingen zijn echter nog veel gevoeliger werktuigen noodig; daarvoor heeft men galvanometers vervaardigd, waarbij het getal der omwindingen zelfs meer dan 30000 bedraagt. Sommige zijn ook zoodanig ingerigt, dat men naar verkiezing het aantal omwindingen grooter of kleiner maken kan, door de pooldraden aan een ander knopje te verbinden.

Hoewel de afwijking bij den galvanometer grooter is, wanneer de stroom sterker wordt, mag men toch alleen de stroomsterkte evenredig aan de afwijking onderstellen, wanneer zij niet meer dan 20° bedraagt. Voor grootere afwijkingen moet men vooraf proefondervindelijk het verband tusschen deze en de stroomsterkte bepalen.

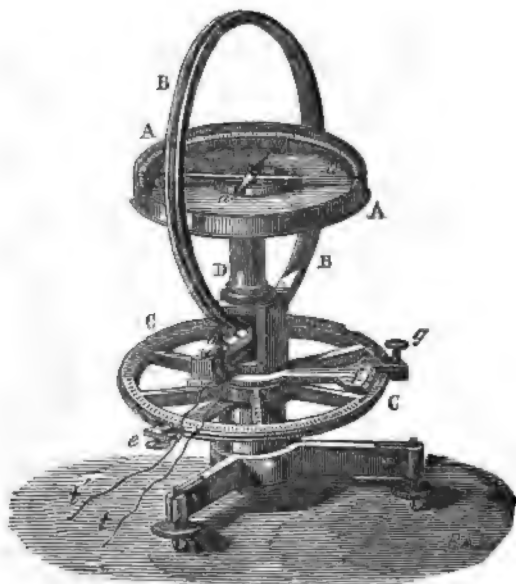
Somtijds maakt men van den galvanometer gebruik om het verschil van twee stroomen te bepalen; in dat geval moet de inrigting echter eenigzins gewijzigd worden. Men windt dan niet éénen, maar twee met zijde omwondene geleiddraden om de houten klos, en laat door elken der draden een der stroomen gaan, daarbij echter zorgende, dat de rigtingen dier stroomen juist aan elkander tegenovergesteld zijn. Elke stroom zal dan op de magneetnaald eene werking uitoefenen, tegenovergesteld van die van den anderen. De sterkste stroom heeft echter de overhand, en uit de grootte der afwijking kan men dan het verschil in sterkte van de beide stroomen afleiden. Aan den aldus gewijzigden toestel,

welke door Becquerel (1825) uitgedacht is, geeft men den naam van *differentiaal-galvanometer*.

334. **Sinus-boussole.** — De galvanometer heeft het gebrek, dat men de stroomsterkte niet onmiddellijk er mede kan bepalen, maar dat men eerst proefondervindelijk eene tafel moet zamenstellen, welke voor elke afwijking van de naald de daarmede overeenstemmende stroomsterkte aanwijst. In dit gebrek heeft Pouillet (1837) voorzien door een toestel, door hem *sinus-boussole* genoemd.

De sinus-boussole bestaat uit eene metalen doos AA (Fig. 310), waarin zich eene beweegbare magneetnaald *ab* bevindt. Aan deze naald is eene langere naald *cd* van hout of ivoor bevestigd, die met de magneetnaald een regten hoek maakt, en wier uiteinden bij een verdeelden cirkel uitkomen, waarop zij de graden aanwijzen. Loodregt op deze doos is de vertikale koperen cirkel BB van ongeveer $3\frac{1}{2}$ palm middellijn geplaatst, zoodanig dat zijn middenpunt zamenvalt met het ophangpunt van de magneetnaald, en dat het midden zich juist bij het nulpunt van den verdeelden cirkel bevindt. Om dezen cirkel wordt een met zijde omwonden tamelijk dikke koperdraad gewonden, wiens uiteinden bij *h* in verband worden gebragt met de pooldraden *t* en *t'* van eene galvanische keten. Onder aan den toestel bevindt zich een horizontale verdeelde cirkel CC, die door middel van het klemschroefje *e* wordt vastgezet; het bovenste gedeelte, namelijk de doos AA met den cirkel BB en den nonius

Fig. 310.



f, kan om eene vertikale as draaijen en door de klemschroef *g* in den verlangden stand geplaatst worden.

Om dezen toestel te gebruiken, plaatst men hem eerst door middel van de stelschroeven zuiver waterpas, en draait daarna het bovenste gedeelte zoo lang om, totdat het vlak van den cirkel BB zamenvalt met dat van den magnetischen meridiaan; daarna plaatst men den afzonderlijk beweegbaren cirkel CC zoodanig, dat zijn nulpunt juist overeenstemt met het nulpunt van den nonius *f*, en stelt hem vervolgens vast met de klem *e*. Brengt men nu de draden *t* en *t'* in verbinding met de polen van eene keten, dan zal de naald *ab* afwijken; men draait dan het bovenste gedeelte zoo lang, totdat de magneetnaald zich weder in het vlak van den cirkel BB bevindt. De naald *cd* zal dan, even als vóór de proef, op 90° wijzen, en de afwijking, welke de magneetnaald door den stroom ondervonden heeft, wordt aangewezen door het aantal graden, dat men den nonius *f* langs den verdeelden cirkel CC verplaatst heeft. Men behoeft deze dus slechts op dien cirkel af te lezen.

Het verband tusschen de stroomsterkte en de waargenomen afwijking laat zich gemakkelijk aantoonen. Is de naald onder den invloed van den stroom tot een bepaalden stand gekomen, dan werken daarop twee krachten; de eene, welke niets anders dan de stroomsterkte is, werkt in de rigting AB (Fig. 311); daarentegen werkt de aard-magneetkracht in eene rigting AC, evenwijdig met den magnetischen meridiaan NZ, die nu niet meer, zoo als vóór de proef, met de naald zamenvalt, maar daarmede een hoek *d* maakt, welke gelijk is aan de waargenomene afwijking. Ontbindt men de kracht AC of I in twee andere, de eene AE gerigt volgens de rigting der naald zelve, de andere AD loodregt daarop, dan zal deze laatste juist gelijk moeten zijn aan de stroomsterkte AB. Daar nu $AD = I \sin d$, zal ook $AB = I \sin d$ moeten zijn; waaruit volgt, dat de sterkte van den stroom evenredig is aan den sinus van den afwijkingshoek. Het is om deze reden, dat men aan den toestel den naam van sinus-boussole gegeven heeft.

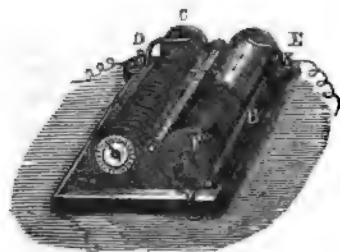
Fig. 311.

Vergelijkt men de sinus-boussole met den gewonen galvanometer, dan bemerkt men, dat het onderscheid alleen daarin bestaat, dat men bij de eerstgenoemde den stroom steeds laat werken in het vertikale vlak, waarin zich de magneetnaald in haren evenwigts-toestand bevindt, terwijl men bij den galvanometer den stroom laat werken in het vlak van den magnetischen meridiaan.

335. **Rheostaat.** — Toen wij hiervóór de wetten hebben aangewezen, welke de betrekking tusschen de stroomsterkte, de electromotorische kracht en den wederstand aanduiden, konden wij nog geene bijzonderheden mededeelen over de werktuigen, waardoor de stroomsterkte bepaald kan worden. De thans beschreven galvanometer en sinus-boussole, benevens nog enkele andere inrigtingen, waarvan wij de beschrijving hier minder noodig achten, stellen ons in staat om zoodanige bepalingen te doen. Somtijds is het echter noodig aan eenen stroom eene bepaalde sterkte te kunnen geven; of hij die sterkte heeft, kan dan blijken uit de grootte der afwijking. Om hem echter die sterkte te geven, moet men andere middelen gebruiken, waarvan het meest doelmatige is eene vermeerdering of vermindering van den geleidingswederstand. Te dien einde bedient men zich van een werktuig, door Wheatstone (1844) uitgedacht en door hem *rheostaat* genoemd. Hoezeer deze toestel op zich zelf beschouwd niets gemeen heeft met de verschijnselen, die wij thans behandelen, achten wij het nogtans hier de meest geschikte plaats om er eene korte beschrijving van te geven.

De rheostaat bestaat uit twee even groote cilinders A en B (Fig. 312); de cilinder A is van hout vervaardigd en aan het uiteinde C voorzien van een metalen ring, waartegen een koperen veêrtje aandrukt, dat met het knopje D verbonden is. Om den cilinder A is in eene spiraalvormige groeve een koperdraad gewonden, waarvan het eene uiteinde aan den ring C is bevestigd, terwijl het andere is vastgemaakt aan het tegenovergestelde uiteinde F van den cilinder B, die van geel koper vervaardigd is en door een koperen veêrtje in verbinding is met het knopje E. Daar beide cilinders om hunne assen kunnen draaijen, zal men, door den cilinder B met behulp van het krukje te draaijen, den koperdraad op dezen opwinden en tevens van A afwinden; draait men daarentegen A in tegenovergestelde rigting, dan zal de werking juist tegenovergesteld zijn. Brengt men nu in de knopjes D en E de pooldraden van eenen stroom, dan zal deze door dat gedeelte van den koperdraad moeten gaan, dat om den cilinder A gewonden is; door het om B gewonden gedeelte gaat hij niet, maar begeeft zich door dien cilinder, die een geleider is, onmiddellijk naar het knopje E. Men zal dus, door den draad meer of minder op den cilinder te winden, den uitwen-

Fig. 312.



digen wederstand grooter of kleiner kunnen maken, en dus ook de stroomsterkte zelve verminderen of vermeerderen. De lengte van den draad, door welken de stroom gaat, kan men bepalen door het aantal omwindingen op A te tellen; het wijzertje bij G geeft, zoo noodig, de onderdeelen van eene omwinding aan.

336. **Magnetisering van staal door een electrischen stroom.** — Gaat men uit van het denkbeeld van Ampère, dat in alle magnetische ligchamen, dat is in de zoodanige, die onder zekere omstandigheden magneten kunnen worden, zich in allerlei rigtingen rondom de moleculen kleine electrische stroomen bewegen, dan volgt daaruit onmiddellijk, dat de nabijheid van eenen electrischen stroom op die gedeeltelijke stroomen eenen bepaalden invloed moet uitoefenen, en hen tot weinige in bepaalde rigtingen loopende stroomen moet vereenigen. Brengt men bijv. eenen stroom spiraalvormig rondom eene ijzeren of stalen staaf, dan zal daarvan het gevolg moeten zijn, dat die gedeeltelijke stroomen alle eene rigting trachten aan te nemen, evenwijdig aan die van den electrischen stroom, welke er op werkt. In die staaf zullen dus evenwijdige en gelijk gerigte stroomen ontstaan, juist zoo als wij ondersteld hebben, dat in eenen magneet aanwezig zijn. Wij mogen dus daaruit afleiden, dat de staaf onder zoodanige omstandigheden dezelfde verschijnselen zal vertoonen als een magneet.

De juistheid dezer gevolgtrekking is in 1820 het eerst proefondervindelijk aangetoond door Arago, die bevond, dat wanneer men een koperdraad, waardoor een electrische stroom gaat, in fijn ijzervijlsel hield, eenige deeltjes daaraan bleven hangen even als aan een magneet, en dat die deeltjes zelven magnetische eigenschappen toonden, zoo lang de stroom door den draad ging. Het duidelijkst kan men den invloed van den stroom op staal aantoonen door de volgende proef. Om eene glazen buis AB wordt een koperdraad gewonden op de wijze in fig. 313 en 314 afgebeeld. In die buis plaatst men eene stalen staaf of naald, en laat vervolgens door den draad een electrischen stroom gaan; heeft deze eenige oogenblikken geduurd, en neemt men daarna de naald er uit, dan bevindt men, dat zij een magneet geworden is. Is de draad gewonden zoo als in fig. 313 is voorgesteld, dat is van de regter- naar de linkerzijde, zoodat

Fig. 313.

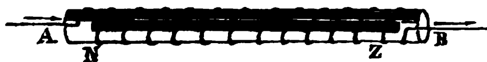
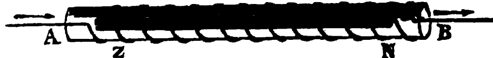


Fig. 314.

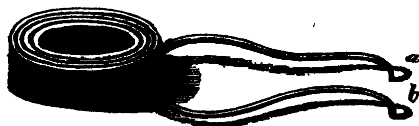


men een linkschen schroefdraad verkrijgt, en komt de stroom in bij A, om bij B weder uit den draad te gaan, dan ontstaat er eene noordpool bij N, waar de stroom binnenkomt, en eene zuidpool bij Z. Is daarentegen de omwinding in eene tegenovergestelde rigting van de linker- naar de regterzijde geschied, zoo als in fig. 314, waar de draad een regtschen schroefdraad vormt, dan is de noordpool bij N gelegen, waar de stroom den draad verlaat. Als regel kan men nemen, dat wanneer men zich plaatst in de rigting van den stroom, de noordpool zich aan de regterhand bevindt.

Het is niet noodig de naald in eene glazen buis te plaatsen, mits men slechts zorg draagt, dat de draad behoorlijk van het staal geïsoleerd is. Men omwindt daarom veelal den draad met zijde, en windt hem dan onmiddellijk om de stalen staaf; men behoeft dan tevens niet te vreezen, dat twee achtervolgende omwindingen met elkander in aanraking zullen komen.

Het is duidelijk, dat men op deze wijze kunstmagneten kan vervaardigen. De krachtigste worden echter verkregen door aan de omwindingen eene eenigzins andere gedaante te geven. Men omwindt te dien einde een koperdraad van 2 tot 3 strepen dikte en ongeveer acht ellen lang met zijde, en buigt dit in den vorm van een ring, zoo als in fig. 315 is voorgesteld, waarvan de binnenste opening 3 tot 4 duim middellijn heeft. Door de twee uiteinden *a* en *b* met de pooldraden van eene galvanische batterij te verbinden, laat men den stroom door den geheelen ring gaan. Houdt men nu eene stalen staaf in de opening van den ring, en beweegt men haar daarin heen en weder, dan wordt zij sterk magnetisch. Deze toestel wordt naar den uitvinder (1844) de ring van Elias genoemd. De sterkste magneten zijn die, welke op deze wijze vervaardigd zijn.

Fig. 315.



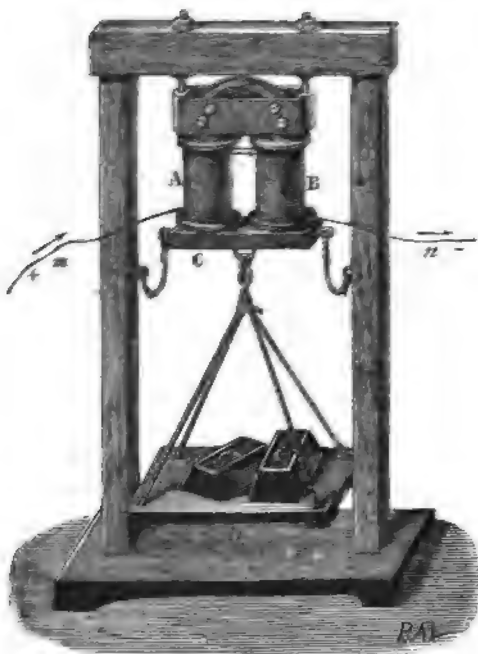
Brengt men de beide uiteinden van den draad in fig. 313 of 314 in verbinding met de beide bekleedingen eener Leidsche flesch, dan zal, wanneer de ontlading der flesch door dien draad plaats heeft, de naald NZ ook magnetisch worden, hoewel in een veel geringeren graad. Brengt men het eene uiteinde van den draad in verbinding met den conductor, en het andere met de kussens eener in werking zijnde electriseer-machine, dan zal eveneens de naald, waarom die draad gewonden is, magnetisch worden.

337. **Electromagneten.** — Wanneer men bij de verschillende zoo even

beschreven proeven, de stalen staaf vervangt door eene staaf van week ijzer, dan zullen de verschijnselen dezelfde zijn, alleen met dit onderscheid, dat het ijzer slechts zoo lang magnetisch blijft als de stroom duurt, doch zijne magnetische eigenschappen aanstonds weder verliest, wanneer de stroom wordt afgebroken; het gebrek aan coërcitief-kracht bij het ijzer is oorzaak, dat de magnetische verschijnselen slechts tijdelijk kunnen zijn. Eene week ijzeren staaf of hoef, welke door een electrischen stroom tijdelijk magnetisch gemaakt wordt, noemt men een *electromagneet.*

In fig. 316 is zoodanige electromagneet voorgesteld. Hij bestaat uit eene hoefvormig omgebogene week ijzeren staaf, om welks uiteinden zich twee houten klossen A en B bevinden, waarom een met zijde omsponnen koperdraad gewonden is; deze hoef is aan een stevig houten raam opgehangen; C is een stuk week ijzer, waaraan eene schaal D is vastgemaakt, waarop men gewigten plaatsen kan. Het uiteinde *m* van den koperdraad wordt in verbinding gebragt met de positieve, het andere uiteinde *n* met de negatieve pool eener sterke galvanische batterij. In het in de figuur voorgestelde geval moet, blijkens den zoo even gegeven regel, het gedeelte van den hoef, waarin de klos A zich bevindt, noordpool en dus het andere uiteinde zuidpool worden. Brengt men het stuk week ijzer C en de schaal met gewigten bij den electromagneet, dan wordt het met kracht aangetrokken. Men kan alsdan een groot gewigt op de schaal plaatsen, alvorens haar van den electromagneet af te doen vallen. Wordt de stroom echter afgebroken, dan houdt de magnetische werking aanstonds op.

Fig. 316.



Uit onderzoekingen van Jacobi, Lenz en Müller is gebleken, dat de magneetkracht bij een electromagneet evenredig is aan de sterkte van den electrischen stroom en aan het getal der omwindingen. Deze wet geldt echter alleen voor dikke staven. Voor dunnere staven, vooral wanneer de stroom sterk is, geldt zij slechts binnen zekere grenzen; de magneetkracht bereikt daarbij weldra haar maximum, dat zij bij versterking van den stroom niet overschrijdt. De draagkracht is afhankelijk van de magneetkracht, doch kan een zeker maximum niet te boven gaan. Welk verband er bestaat tusschen de draagkracht, de afmetingen van den electromagneet en het getal der omwindingen, heeft men nog niet met zekerheid kunnen aanwijzen. Volgens Becquerel behoort de lengte van elk omwonden been van een hoefvormigen electromagneet 3 tot 4 maal grooter te zijn dan de middellijn der staaf, terwijl de afstand der beenen ongeveer $1\frac{1}{2}$ of 2 maal die middellijn moet bedragen. Om electromagneten met groote draagkracht te vervaardigen zijn weinig omwindingen van een dikken draad van 1 tot 4 strepen middellijn voldoende, althans wanneer de stroom sterk is; bij zwakke stroomen behoort men een groot aantal omwindingen van dunne draden te nemen. De draagkracht der electromagneten is veel aanzienlijker dan die van natuurlijke of kunstmagneten; men heeft er vervaardigd, die 40 maal hun eigen gewigt droegen. Te Parijs bevindt er zich een, die 1000 pond dragen kan.

Bij de bereiding van het ijzer moet men verscheidene voorzorgen in acht nemen. Het moet zoo zuiver mogelijk zijn en vooral goed week; deze laatste eigenschap geeft men er aan door het herhaaldelijk te gloeijen, en telkens zeer langzaam te laten bekoelen.

E. THERMO-ELECTRICITEIT.

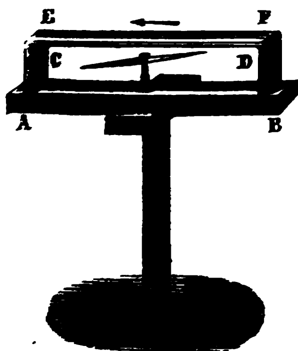
338. **Opwekking van een electrischen stroom door verwarming van twee onderling verbonden metalen.** — In de voorgaande afdeelingen van dit hoofdstuk hebben wij over electrische stroomen gehandeld, welke ontstonden door scheikundige werking of door den invloed van een magneet; wij moeten nu nog eene andere bron van electriciteit leeren kennen, namelijk de warmte.

Hiervóór (266) is reeds opgemerkt, dat warmte in sommige gevallen aanleiding kan geven tot electrische werking; als voorbeeld daarvan is toen de tourmalijn genoemd, die enkel door verwarming de eigenschap verkrijgt van

ligte ligchaampjes te kunnen aantrekken. Ook enkele andere kristallen bijv. van mesotyp, van kiezelzinkerts, van suiker, hebben dezelfde eigenschap, hoewel in veel geringere mate.

Volta had opgemerkt, dat wanneer een stuk zilver aan zijne beide uiteinden ongelijk verwarmd werd, er een electrische stroom ontstond. Anderen, die proef na hem herhalende, vonden dit beweren niet altijd bevestigd. Deze proeven trokken echter weinig de aandacht, tot in 1821 Seebeck het eerst waarnam, dat wanneer twee staven van verschillende metalen met de uiteinden aan elkander gesoldeerd waren, zoodat het geheel eene gesloten geleiding vormde, het voldoende was om de beide punten, waar de metalen aan elkander gesoldeerd zijn, ongelijk te verwarmen, ten einde een electrischen stroom te verkrijgen. Men kan de proef gemakkelijk herhalen met den in fig. 317 afgebeelden toestel; AB is eene staaf van bismuth, waarop in de punten C en D eene omgebogene koperen staaf EF is vastgesoldeerd. Tusschen de twee staven wordt eene magneetnaald geplaatst, welke, zoo de toestel in de rigting van den magnetischen meridiaan geplaatst wordt, zich in de rigting van de staaf AB zal plaatsen. Wordt nu het punt D, waar de twee metalen aan elkander gesoldeerd zijn, door de vlam van eene spirituslamp verhit, terwijl het andere soldeerpunt C de temperatuur van de omringende lucht behoudt, dan wijkt de magneetnaald af; er moet dus een electrische stroom ontstaan zijn. Verwarmt men C, terwijl D de temperatuur van de lucht behoudt, dan wijkt de naald aan den anderen kant af, ten bewijze dat er een stroom in tegenovergestelde rigting is ontstaan. De stroom, dien men wegens zijnen oorsprong een *thermo-electrische* stroom noemt, is altijd gerigt van de verwarmde plaats door het koper naar het niet verwarmde verbindingspunt der beide metalen; hij is des te sterker, naarmate het verschil in temperatuur op die beide plaatsen aanzienlijker is.

Fig. 317.



Koper en bismuth zijn niet de eenige metalen, welke deze eigenschap hebben; ook andere vertoonen die in meerdere of mindere mate. Worden twee verschillende metaaldraden aan elkander gesoldeerd of sterk tegen elkander gedrukt, en de vrije uiteinden met een galvanometer verbonden, dan zal

de naald van dezen afwijken, wanneer de plaats, waar de beide metalen aan elkander komen, verwarmd wordt. Even als voor de galvanische stroomen, kan men ook voor de thermo-electrische de metalen in eene bepaalde volgorde rangschikken, zoodat elk metaal positief is ten opzigte van het voorgaande, doch negatief ten opzigte van het volgende. Volgens Becquerel is die spannings-reeks voor de voornaamste metalen de volgende:

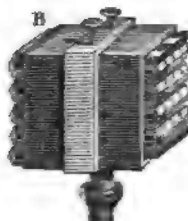
Bismuth.
Nikkel.
Platina.
Kobalt.
Zilver.
Tin.
Lood.
Geelkoper.
Koper.
Goud.
Zink.
IJzer.
Antimonium.

Neemt men bijv. bismuth en antimoninm, dan ontstaat er bij verwarming van het verbindingspunt in dat punt een stroom van het bismuth naar het antimonium. Door deze verbinding verkrijgt men den sterksten thermo-electrischen stroom, daar deze beide metalen het verst van elkander verwijderd zijn in bovenstaande reeks. Hierbij valt echter nog op te merken, dat deze reeks niet voor alle warmtegraden geldt, maar alleen wanneer de temperatuur niet hooger klimt dan 100°. Bij hoogere temperatuur verwisselen sommige metalen van plaats. Bij ijzer en koper bijv. nemen de spanning en de stroomsterkte toe tot 250°; bij hoogere warmtegraden verminderden zij weder, zoodat er bij ruim 400° geen stroom wordt waargenomen; bij 500° neemt men echter weder een stroom waar, doch nu niet van het koper naar het ijzer, maar van het ijzer naar het koper.

339. **Thermo-electrische kolom.** — Fourier en Oersted zijn de eersten geweest, die getracht hebben den thermo-electrischen stroom door bijeenvoeging van meer elementen te versterken, even als zulks bij galvanische stroomen geschiedt. Door verscheidene staafjes bismuth en antimonium beur-

telings met elkander te verbinden en de verbindingspunten om den ander te verwarmen en te verkoelen, bevonden zij dat de stroom aanmerkelijk in sterkte toenam. Men heeft sedert verschillende inrigtingen uitgedacht om thermo-electrische kolommen zamen te stellen. De zamenstelling, welke het meest gebruikt wordt, is die van Nobili; deze is in fig. 318 voorgesteld. Hij vereenigde vijf staafjes bismuth en even zoo veel staafjes antimonium op de wijze, zoo als bij A is voorgesteld. Aan het uiteinde *b* van het onderste bismuth-staafje wordt het antimonium-staafje van een volgend vijftal elementen gesoldeerd, en zoo verder tot men 20, 25 of 30 elementen vereenigd heeft. Deze worden, door de eene of andere isolerende stof behoorlijk van elkander gescheiden, en daarna, zoo als bij B is afgebeeld, gezamenlijk in een metalen koker geplaatst. Aan de beide uiteinden, het eene van bismuth, het andere van antimonium, welke de polen van de thermo-electrische kolom uitmaken, worden koperdraden bevestigd. Worden nu alle soldeerpunten, die zich aan den eenen kant bevinden, aan eene hoogere temperatuur blootgesteld dan die aan den anderen kant, dan ontstaat er aanstonds een stroom. Aan de afwijking van de naald van een galvanometer bemerkt men, dat het antimonium-uiteinde de positieve pool vormt, het bismuth-uiteinde de negatieve. Onder dezen vorm wordt de thermo-electrische kolom het meest gebruikt, hoofdzakelijk bij den thermo-multiplicator van Melloni, dien wij hiervóór (156) beschreven en in fig. 162 afgebeeld hebben, en die groote diensten bewijst, wanneer men kleine temperatuur-verschillen heeft waar te nemen.

Fig. 318.





De sterkte der thermo-electrische stroomen is evenredig aan het getal thermo-electrische paren of elementen; de spanning der electriciteit is echter slechts zeer gering in vergelijking van die bij de galvanische stroomen. Van daar dat deze soort van stroomen zeer slecht door vloeistoffen geleid worden, en dat zij daarop dus ook doorgaans geene scheikundige werking uitoefenen. Nogtans heeft Botto (1832), door 120 elementen van platina en ijzer te verbinden, eene zwakke ontleding van het water kunnen bewerkstelligen.

340. **Thermo-electrische stroomen, opgewekt in eene gesloten geleiding van één metaal.** — Wij hebben tot dusverre alleen gewag gemaakt van thermo-electrische stroomen, opgewekt door verwarming

van het soldeerpunt van twee verschillende metalen. Uit onderzoekingen van Seebeck, Becquerel, Magnus en anderen is echter gebleken, dat ook dan, wanneer de geleiding slechts uit één metaal is zamengesteld, er onder bijzondere omstandigheden zoodanige stroomen kunnen ontstaan. Wij zullen enkele der verschijnselen vermelden, welke daarbij waargenomen worden.

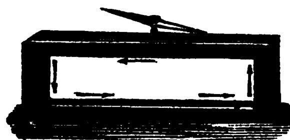
Uit de onderzoekingen van Magnus is gebleken dat, als een metaal-draad overal even dik en homogeen is, en zijne oppervlakte zuiver, er geen stroom ontstaat, wanneer hij verwarmd wordt. Ook dan wanneer de middellijn niet over de geheele lengte van den draad dezelfde is, ontstaat er geen stroom. Is een gedeelte van den draad glad gepolijst en een ander gedeelte ruw, en verwarmt men het punt, waar de toestand der oppervlakte verandert, dan verkrijgt men geen stroom; evenmin, wanneer men de oppervlakte bedekt met verschillende zelfstandigheden, zoo als rookzwart, gutta-percha, en dergelijke, waardoor het uitstralend vermogen gewijzigd wordt. Hieruit volgt tevens, dat verschil in de wijze van voortplanting der warmte in de verschillende gedeelten van den draad niet voldoende is om een thermo-electrischen stroom te verwekken. Is daarentegen de oppervlakte bedekt met een dun laagje oxyd, of met een ander metaal, dan ontstaat er bij verwarming van het punt, waar de verschillende deelen aan elkander grenzen, een stroom; maar in dit geval heeft men eigenlijk ook twee verschillende zelfstandigheden.

Mogt dus de aard der oppervlakte en verschil in dikte van den draad geen aanleiding geven tot electrische stroomen, de moleculaire toestand van de verschillende deelen van den draad kan wel bij verwarming een stroom doen ontstaan. Neemt men een metaaldraad, die gedeeltelijk getrokken, gedeeltelijk gehamerd of gedeeltelijk gehard is, en verwarmt men het gedeelte waar deze twee draden van verschillende moleculairen toestand bij elkander komen, dan ontstaat er altijd een stroom. De rigting van den stroom hangt af van den aard van het metaal; bij sommigen gaat de stroom van het geharde naar het getrokken gedeelte, bij anderen in tegenovergestelde rigting. Uit proeven van Magnus is gebleken, dat de snelheid, waarmede de warmte zich in de verschillende gedeelten voortplant, dezelfde is, zoodat men ook hier de oorzaak van de opwekking van electriciteit niet, zoo als sommigen meenen, in een verschil van die voortplantingssnelheid kan zoeken.

Neemt men een platinadraad en maakt men daarin een knoop, of rolt men een gedeelte daarvan spiraalvormig op, en verwarmt men dan den draad in de nabijheid van dat gedeelte, na de uiteinden met een galvanometer verbonden te hebben, dan bemerkt men een stroom van het verwarmde gedeelte naar den

knoop of de spiraal. Magnus schrijft dezen stroom toe aan eene verandering in moleculairen toestand, dien het gebogene gedeelte heeft ondergaan. Becquerel vond, dat wanneer men de beide uiteinden van een langen platinadraad met den galvanometer verbindt, vervolgens den draad midden door knipt en de uiteinden als eene vlakke spiraal opwindt, zooals eene horlogieveêr, en daarna eene dier spiralen verwarmt en op de niet verwarmde legt, de naald van den galvanometer afwijkt en een stroom aanwijst van het warme gedeelte door den platinadraad naar het koudere. Magnus heeft ook dit geval onderzocht voor andere metalen, doch heeft bevonden, dat men geen vaste regels voor het ontstaan dier stroomen kan opgeven. Dat het verschil in moleculairen toestand bij de verschillende deelen van een draad invloed uitoefent, kan nog blijken uit de volgende proef. Men neemt een regthoek van gegoten antimonium van den in fig. 319 afgebeelden vorm, en plaatst daarop eene magneetnaald, nadat men den regthoek zelven in de rigting van den magnetischen meridiaan heeft opgesteld. Verwarmt men nu achtervolgens met eene spirituslamp verschillende deelen van den regthoek, dan neemt men dan eens een stroom, dan weder geen stroom waar. Men bemerkt dan, dat er enkele punten zijn welke de eigenschappen hebben, dat als men het metaal ter regterzijde verwarmt, er een stroom in de eene rigting ontstaat, doch dat bij verwarming ter linkerzijde die stroom wordt omgekeerd. Matteucci heeft aangetoond, dat deze punten alleen worden aangetroffen in die gedeelten van het metaal, waar de kristallisatie door plotselinge afkoeling of door eenige andere oorzaak gestoord is geworden.

Fig. 319.



341. **Oorzaak der thermo-electrische stroomen.** — Uit het voorgaande blijkt duidelijk, dat het vooralsnog moeijelijk is de oorzaak der thermo-electrische stroomen met eenige zekerheid aan te wijzen. Wel weet men, dat de warmte en wel de ongelijke verwarming van verschillende deelen tot stroomen aanleiding geeft, maar de wijze, waarop dit geschiedt, is onbekend. De hiervóór vermelde proeven van Magnus hebben tot het besluit geleid, dat verschil in voortplantingssnelheid der warmte niet als de eenige oorzaak mag beschouwd worden. Dit alleen blijkt uit de hier vermelde eigenschappen, dat er een naauw verband moet bestaan tusschen warmte, electriciteit en moleculaire toestand, waarvan echter de wetten en zelfs de bijzonderheden ons nog niet bekend zijn.

F. INDUCTIE.

342. **Electro-dynamische inductie.** — Bij de behandeling der wrijvings-electriciteit hebben wij de verschijnselen leeren kennen, die een electrisch ligchaam te weeg brengt in een daarnevens geplaatsten geleider, welke zich in den neutralen toestand bevindt; wij hebben toen gezien (250), dat de beide electrische vloeistoffen door de werking van het electrisch ligchaam tijdelijk gescheiden worden, en hebben dit verschijnsel door den naam van inductie of verdeeling aangeduid. Iets dergelijks wordt ook bij de electrische stroomen waargenomen. Deze verschijnselen zijn het eerst in 1831 door Faraday ontdekt, die bevond dat in eenen geleider electrische stroomen kunnen ontstaan door de werking, hetzij van een anderen stroom, hetzij van een magneet, hetzij van het aardmagnetisme. De verschijnselen van deze stroomen, door hem *geïnduceerde* of *nevenstroomen* genoemd, zullen wij thans beschouwen.

343. **Inductie door een galvanischen stroom.** — Wanneer men door een langen koperdraad een tamelijk sterken stroom laat gaan, en in de onmiddellijke nabijheid van dien draad eene tweede draadgeleiding plaatst, waarin zich een galvanometer bevindt, dan zal men aan de naald van dezen bemerken dat, op het oogenblik dat de keten gesloten wordt en dus de stroom door den eerstgenoemden draad begint te gaan, in de andere draadgeleiding een stroom wordt opgewekt in de tegenovergestelde rigting. Zoodra de keten gesloten is, keert de naald van den galvanometer na eenige schommelingen tot zijn vorigen stand terug, waarin hij blijft, zoo lang de inducerende stroom voortwerkt. Wordt de keten weder geopend, dan ontstaat er in den tweeden draad weder een stroom, maar thans in dezelfde rigting als de hoofdstroom, dus tegenovergesteld aan dien, welke bij het sluiten van de keten ontstaan was. Wij hebben hier dus geene doorgaande of voortdurende inducerende werking, maar slechts eene oogenblikkelijke bij het sluiten en bij het openen van de keten, de eerste in tegenovergestelde, de andere in dezelfde rigting als die van den inducerenden stroom.

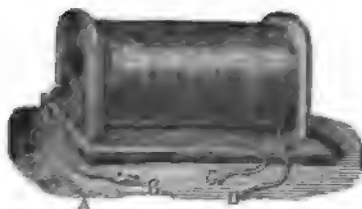
Om geïnduceerde stroomen van merkbare sterkte te verkrijgen, heeft men zeer lange draadgeleidingen noodig; men geeft er te dien einde den vorm van spiralen aan, na den draad, ten einde onderlinge aanraking van verschillende gedeelten te beletten, met zijde omwonden te hebben. Op de doelmatigste wijze geschiedt dit door de draden te winden om houten cilindrische klossen

Fig. 320.



zoo als in fig. 319 is voorgesteld. Om A is de draad gewonden, waardoor men den electrischen stroom laat gaan; om B bevindt zich een andere dunnere draad, wiens uiteinden bij de knopjes C en D uitkomen. Daar de inductie des te aanzienlijker is, naarmate de twee draden digter bij elkander geplaatst zijn, zoo zijn de beide rollen doorgaans zoodanig ingerigt, dat men ze in elkander kan schuiven. Laat men den gesloten stroom onophoudelijk door den om A gewonden draad gaan, dan zal het insteken van de rol A in B dezelfde uitwerking hebben, als het sluiten van den hoofdstroom, het uithalen dezelfde werking als het afbreken van dien stroom. Dikwijls echter gebruikt men slechts eene enkele rol, waarom dan eerst de dikkere geïsoleerde koperdraad gewonden is, waardoor men den hoofdstroom laat gaan, en daaromheen de dunne draad, waarin de geïnduceerde stroom ontstaat, daarbij echter zorg dragende, dat de vier uiteinden behoorlijk van elkander gescheiden blijven. Zulk eene rol is afgebeeld in fig. 321; de draden A en B zijn de uiteinden van de draadgeleiding, waardoor de hoofdstroom gaat; C en D zijn de uiteinden van de draadgeleiding voor den geïnduceerden stroom.

Fig. 321.



344. **Inductie door een magneet.** — Uitgaande van de hiervóór (330) verklaarde theorie van Ampère aangaande den aard der magneetkracht, moet men tot het besluit komen, dat een magneet, even als een electrische stroom, eene induceerende werking op eene draadgeleiding moet uitoefenen. Faraday heeft ook dit het eerst onderzocht, en door eene eenvoudige proef kan men zich overtuigen, dat de verschijnselen zich juist zoo voordoen, als

volgens de theorie van Ampère het geval moet zijn. Men neemt namelijk de met eenen draad omwonden klos B (Fig. 320), en brengt de uiteinden met eenen galvanometer in verbinding. Steekt men nu plotseling een magneet binnen in den cilinder, dan bemerkt men aanstonds eene afwijking van de magneetnaald, welke wordt veroorzaakt door een stroom tegenovergesteld aan dien, welke volgens de theorie van Ampère in den magneet ondersteld wordt. Laat men den magneet in den cilinder, dan keert de naald tot haren oorspronkelijken stand terug; bij het plotseling wegnemen van den magneet wijst zij echter weder een stroom aan, en wel in dezelfde rigting loopende als die in den magneet. De verschijnselen zijn dus volkomen dezelfde als bij de inductie door een galvanischen stroom.

Men kan de proef nog anders inrigten, door in de inductierol B een week ijzeren cilinder te plaatsen, en dezen plotseling magnetisch te maken door een magneet in zijne nabijheid te brengen. De verschijnselen zijn dan volkomen dezelfde, als wanneer men den magneet zelven in de rol had gestoken.

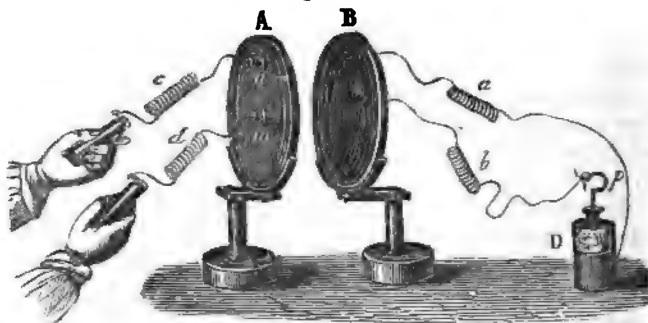
Wanneer men in eene inductierol met dubbelen draad eenen week ijzeren cilinder plaatst, dan wordt de werking aanmerkelijk versterkt. De inductiestroom veroorzaakt een vrij hevigen schok, zooals men bemerkt, wanneer men de met metalen plaatjes voorziene uiteinden van de spiraal, waardoor die stroom gaat, in de handen neemt, en dus den stroom door het ligchaam laat gaan; bij het openen en sluiten van den hoofdstroom gevoelt men dan telkens een schok. Deze physiologische werking wordt echter ook aanmerkelijk door den ingestoken week ijzeren cilinder versterkt. De oorzaak van die versterking moet alleen daarin gezocht worden, dat die cilinder door de werking van den hoofdstroom een electro-magneet wordt, en dus eveneens inducerend werkt. Men heeft dus op den buitensten draad de dubbele werking van den galvanischen stroom en van den magneet. Sturgeon heeft het eerst waargenomen, dat de physiologische werking de aanzienlijkste is, wanneer men den ijzeren cilinder vervangt door een bundel ijzerdraad. Volgens Magnus moet dit daaraan worden toegeschreven, dat de hoofdstroom, waarin hij wordt afgebroken, ook door inductie eveneens gerigte stroomen in het ijzer verwekt, die veroorzaken, dat de magnetische toestand van het ijzer niet aanstonds ophoudt, en dat dus zijn invloed op den inductiestroom minder aanzienlijk is. Daar nu die stroomen in een bundel ijzerdraad niet zoo gemakkelijk ontstaan als in eene enkele massa, zoo doet zich in dit geval de zoo even gemelde schadelijke invloed minder gevoelen.

345. **Inductie door het aard-magnetisme.** — Op gelijke wijze

als men door een electrischen stroom of door een magneet een geïnduceerde stroom kan verkrijgen, kan zulks ook door de werking van het aard-magnetisme geschieden. Men kan zich daarvan overtuigen, door een met een langen geïsoleerden koperdraad omwonden rol, waarvan de beide uiteinden met een galvanometer verbonden zijn, zoodanig te plaatsen, dat zijne as zich in het vlak van den magnetischen meridiaan bevindt, en evenwijdig is aan de inclinatienaald. Draait men deze draadgeleiding 180° om, dan wijkt de naald van den galvanometer af; brengt men haar daarna weder in haren oorspronkelijken stand, dan neemt men andermaal eene afwijking van de naald waar, doch in tegenovergestelde rigting; in beide gevallen ontstaan er dus geïnduceerde stroomen, en wel in tegenovergestelde rigting. Brengt men eene ijzeren staaf binnen in de draadgeleiding, dan wordt de werking aanmerkelijk versterkt, daar die staaf dan door de werking van het aard-magnetisme zelve magnetisch wordt. Uit de onderzoekingen van Faraday en anderen blijkt duidelijk, dat de inducerende werking der aarde volkomen dezelfde is, als wanneer zich daar binnen een sterke magneet bevond, in de rigting van de inclinatienaald geplaatst, of als eene menigte electrische stroomen van het oosten naar het westen gerigt.

346. **Inductie door de ontlading van statische electriciteit.** — Niet alleen door magnetisme of door dynamische electriciteit, maar ook door de ontlading eener Leidsche flesch kan een geïnduceerde stroom ontstaan. Men kan zich daarvan overtuigen door den in fig. 322 afgebeelden

Fig. 322.



toestel, die oorspronkelijk door Riess uitgedacht, doch later door Matteucci gewijzigd is. Op de naar elkander toegekeerde oppervlakten van twee houten

of glazen schijven A en B zijn behoorlijk geïsoleerde koperdraden spiraalvormig vastgemaakt, terwijl de uiteinden van den draad op A uitkomen bij *m* en *n*, en die van den draad op B in twee punten aan de achterzijde van die schijf. Den koperdraad *a* brengt men in aanraking met de buitenbekleeding, en *b* met den knop eener geladene Leidsche flesch; deze zal zich ontladen, en de ontlading zal dus door den op B bevestigden spiraaldraad heengaan. Houdt tevens een ander de beide uiteinden *c* en *d* van den op A bevestigden draad in de hand, of wat nog beter is, twee daaraan bevestigde koperen cilinders, dan zal hij een schok gevoelen op het oogenblik dat de vonk bij *p* overspringt. De electrische stroom, waardoor die schok veroorzaakt wordt, kan niet anders dan door inductie ontstaan zijn. De wijze waarop die ontstaat, of namelijk de plotselinge geïnduceerde stroom een verschijnsel is, dat meer overeenkomst heeft met de ontlading der statische electriciteit, of dat het moet beschouwd worden als de opeenvolging van twee geïnduceerde ontladingen, de eerste bij het begin en de andere bij het eind van de ontlading door de spiraal A, zullen wij thans in 't midden laten, daar dit ons te veel tot zuiver theoretische beschouwingen zoude brengen. Wij bepalen ons dus tot de opmerking, dat de onderzoekingen van Verdet (1848) het zeer waarschijnlijk gemaakt hebben, dat dit laatste het geval is, en dat de electrische ontlading zelve moet beschouwd worden als bestaande uit twee elkander opvolgende gedeelten, waarvan het eerste, gedurende hetwelk de snelheid der electriciteit toeneemt, aanleiding geeft tot een geïndnceerden stroom in omgekeerde rigting, terwijl het tweede, gedurende hetwelk die snelheid vermindert, een geïnduceerde stroom doet ontstaan, in dezelfde rigting als die, waarin de ontlading plaats heeft. Door deze wijze van beschouwing valt de overeenkomst met de andere verschijnselen van electro-dynamische inductie nog meer in het oog.

347. **Opwekking van magnetisme door rotatie.** — Wanneer men eene metalen schijf om haar middenpunt laat draaijen in nabijheid van de tegenovergestelde polen van een magneet of van een electromagneet, dan ontstaan er in die schijf geïnduceerde stroomen. Uit de onderzoekingen van Faraday en vooral uit die van Matteucci (1854) is gebleken, dat de rigting dier stroomen zeer zamengesteld is, daar op sommige punten van de oppervlakte dier schijf geen stroomen worden waargenomen, op andere wel. Wij zullen dienaangaande in geene bijzonderheden treden, doch vermelden dat verschijnsel alleen, omdat het verklaring geeft van een ander, door Arago in 1825 ontdekt, en dat men gemakkelijk aanschouwelijk maken kan.

Men laat eene horizontaal geplaatste metalen schijf, liefst eene koperen,

schielijk om haar middenpunt in de rondte draaijen, door hare vertikale as op de eene of andere wijze door middel van getande raderen of riemen met eene kruk in verbinding te brengen. Op geringen afstand boven deze schijf plaatst men eene glazen plaat, en daarop eene beweegbare magneetnaald. Brengt men nu de schijf in beweging, dan ziet men weldra de naald afwijken in dezelfde rigting, waarin ook de schijf bewogen wordt; de afwijking zal aanzienlijker wezen, naarmate de snelheid van de plaat grooter is. Draait deze met zeer groote snelheid om, dan volgt de naald die beweging en draait ook in dezelfde rigting als de schijf rond.

Bij eene koperen schijf is de werking de sterkste, iets minder bij zink, veel geringer bij tin en lood, en slechts zeer gering bij bismuth en antimonium. Zijn er in de schijf spleten gemaakt van het middenpunt naar den omtrek, dan is ook de werking veel geringer. Worden echter die spleten in eene koperen schijf met tin toegesoldeerd, dan is de werking nagenoeg even sterk als bij eene schijf, geheel uit koper vervaardigd.

Dit verschijnsel laat zich door inductie verklaren. De magneet werkt inducerend op de in beweging gebragte koperen schijf, waarin dientengevolge stroomen ontstaan; deze stroomen oefenen wederom op de magneetnaald eene werking uit, waardoor zij uit den magnetischen meridiaan gebragt wordt.

348. **Inductie-stroomen van verschillende orde.** — Een inductiestroom, in de nabijheid van eene geslotene draadgeleiding gebragt, bewerkt daarin door inductie ook weder een stroom. Dit verschijnsel is het eerst aangetoond door Henry, die heeft doen zien, dat men zelfs inductiestroomen van de vierde of vijfde orde kan verkrijgen, door een stroom inducerend te laten werken op eene spiraalvormig opgewonden draadgeleiding, den in deze ontstanen stroom weder op eene andere draadgeleiding, en zoo verder. Op grond van de hiervóór vermelde eigenschappen der inductiestroomen moet de rigting van elken volgenden inductiestroom tegenovergesteld zijn aan die van den voorgaanden.

349. **Extra-stroomen.** — De op de voorgaande bladzijden beschrevene inductieverschijnselen werden voortgebragt, doordat in eenen geleiddraad een inductiestroom werd opgewekt, hetzij door een electrischen stroom, die door eene andere draadgeleiding ging, hetzij door magneetkracht. Het is echter uit latere onderzoekingen van Faraday gebleken, dat beide stroomen, zoowel de inductiestroom als de geïnduceerde, zich in een zelfden draad kunnen vertoonen. Hij vond namelijk, dat op het oogenblik dat men bij een enkel

element de door middel van een lang koperdraad gesloten keten opent, er in dien draad een zoogenaamde *extra-stroom* ontstaat, dien men duidelijk kan maken door aan elk der uiteinden van dien draad een koperen plaatje te solderen, en deze plaatjes door een anderen geleider met elkander te verbinden. Neemt men voor dien geleider een dunnen platinadraad, dan wordt die aanstonds gloeijend; bevindt zich water daartusschen, dan wordt het ontleed; is eene magneetnaald in de draadgeleiding geplaatst, waardoor die stroom gaat, dan wijkt zij af. Geschiedt de verbinding van de beide bovengemelde plaatjes door een slechten geleider, dan ontstaat er op het punt, waar de keten geopend wordt, eene sterke vonk; is daarentegen die geleider goed, dan bemerkt men geene vonk; in het eerste geval gaat de extra-stroom door de galvanische cel heen, in het tweede door het goed geleidend ligchaam, dat de beide plaatjes verbindt. Brengt men die plaatjes bij elkander, dan bemerkt men eene vonk; neemt men er een in elke hand, dan gevoelt men een schok.

Men kan de sterkte van den extra-stroom aanzienlijk vermeerderen door den draad, die de polen van de keten verbindt, spiraalvormig op te winden, vooral ook door daarin een week ijzeren cilinder te plaatsen; op die wijze kan de extra-stroom zelfs drie vierden van de sterkte van den hoofdstroom verkrijgen. Men heeft hier dezelfde verschijnselen als bij de inductie tusschen twee draadgeleidingen, alleen met dat onderscheid, dat zij in een enkelen geleiddraad plaats hebben. De achtervolgende omwindingen werken op elkander, iedere is inducerend en wordt geïnduceerd; het ijzer, door den stroom magnetisch gemaakt, werkt weder door inductie op de omwindingen terug en versterkt den stroom. De rigting van den extra-stroom is zoodanig, dat hij in den spiraalvormig opgewonden draad in dezelfde rigting loopt als de stroom zelf, welke hem deed ontstaan. Ook dit komt met de inductieverschijnselen overeen, daar de extra-stroom eerst dan ontstaat, wanneer de keten geopend wordt.

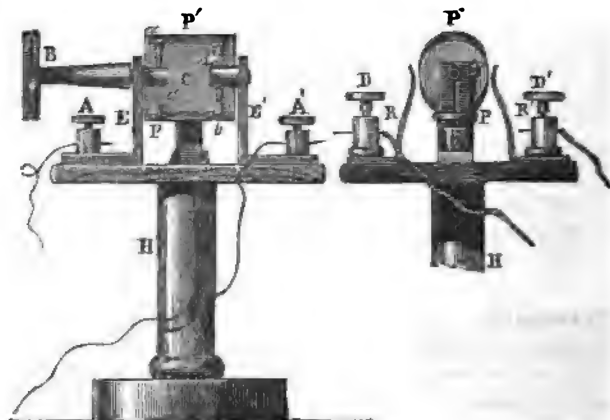
350. **Wetten der inductiestroomen.** — De wet, volgens welke de sterkte van een inductiestroom afhangt van de sterkte van den inducerenden stroom en van de lengte en middellijn der draden, is moeijelijk met volkomen juistheid op te geven. Uit de laatste onderzoekingen van Matteucci (1854) blijkt het, dat de stroomsterkte der inductiestroomen als evenredig aan die der inducerende stroomen kan beschouwd worden, en tevens als evenredig aan het produkt van de lengten van de inducerende en geïnduceerde draadgeleidingen. De ondervinding heeft bovendien geleerd, dat de sterkte toeneemt,

wanneer men verscheidene met draden omwonden rollen onderling verbindt, in welk geval echter een sterke induceerende stroom vereischt wordt.

351. **Toestellen tot omkeeren en afbreken van een stroom.** — Alvorens over te gaan tot de beschrijving van de verschillende toestellen, gegrond op de hiervóór vermelde eigenschappen der inductiestroomen, zullen wij nog een paar inrigtingen beschrijven, die daarbij gedurig te pas komen, en welke dienen om den stroom plotseling van rigting te doen veranderen of om hem telkens af te breken en weder te sluiten.

Aan een toestel, waardoor de stroom wordt omgekeerd, geeft men den naam van *commutator*. Van de verschillende inrigtingen, welke men daaraan gegeven heeft, zullen wij alleen de in fig. 323 en 324 voorgestelde beschrijven. C is een ivoren, glazen of houten cilinder, van twee metalen tappen voorzien, welke rusten op de beide metalen pijlertjes E en E′; aan den tap aan den linkerkant is een knopje B bevestigd, waarmede men den cilinder kan doen omdraaijen. Op dezen isolerenden cilinder bevinden zich twee metalen belegsels P en P′, die elkander niet aanraken en wier vorm het duidelijkst uit fig. 324 is op te maken; elk dezer stukken metaal is op den isole-

Fig. 323. Fig. 324.

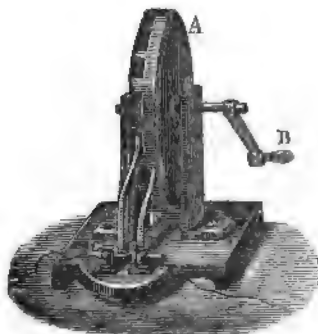


renden cilinder bevestigd met twee metalen schroeven, waarvan de eene uitkomt in den metalen tap, terwijl de andere niet tot aan het metaal reikt. De plaat P heeft dus door de schroef *b* gemeenschap met den tap *d′* en het

pijlertje E′, terwijl de schroef *a* de plaat P′ met den tap *d* en het pijlertje E verbindt. Op den voet bevinden zich vier koperen knopjes met schroefjes, A, A′, D en D′, waarvan de beide eersten in verbinding zijn met de pijlertjes E en E′, en wel A met E en dus met P′, en A′ met E′ en dus met P; daarentegen is de knop D in verbinding met de koperen veêr R, en de knop D′ met de veêr R′. Worden nu de pooldraden van eene electrische keten verbonden met de knopjes D en D′, dan zal in den stand van fig. 324 de de keten niet gesloten zijn. Wordt nu echter door middel van den knop B de cilinder C 90° omgedraaid, zoodat P tegen R en P′ tegen R′ aankomt, en brengt men de in A en A′ gestoken koperdraden in verbinding met een galvanometer of met eene draadgeleiding, zooals bij de inductieverschijnselen gebruikt wordt, dan zal de keten gesloten zijn. Stellen wij, dat de positieve stroom bij R inkomt, dan gaat hij achtervolgens door P, *b*, *d*′, E′, A′, daarna door de draadgeleiding, en voorts door A, E, *d*, *a*, P′ naar R′. Draait men daarentegen den cilinder C zoodanig om, dat P′ tegen R en P tegen R′ komt, dan volgt de stroom achtervolgens R, P′, *a*, *d*, E, A, den geleiddraad, A′, E′, *d*′, *b*, P en R′; hij heeft dus juist eene tegenovergestelde rigting als in het eerste geval. Hieruit blijkt, dat het voldoende is om den cilinder C om te draaijen, ten einde den stroom, die door den geleiddraad gaat, af te breken en om te keeren.

Sommige toestellen zijn niet, zooals de hier beschrevene, bestemd om den stroom om te keeren of op te doen houden, maar alleen om hem telkens af te breken en weder te sluiten. Van zoodanigen aard is de in fig. 325 afgebeelde, welke bestaat uit eene houten of ivoren schijf A, die door middel van eene kruk B wordt omgedraaid; op den omtrek is zij met metaal belegd, dat echter zoodanig is uitgesneden, dat aan den regterkant de geheele omtrek met metaal belegd is, terwijl aan de linkerzijde even groote gedeelten metaal en hout elkander afwisselen. In de knopjes C en D zijn twee koperen veêren E en F bevestigd. Brengt men nu in het knopje C den positieven pooldraad van eene keten, in het andere D het uiteinde van een geleiddraad, waarvan het andere uiteinde met den negatieven pooldraad van de keten verbonden is, dan zal men inzien, dat het alleen van den stand van de schijf

Fig. 325.



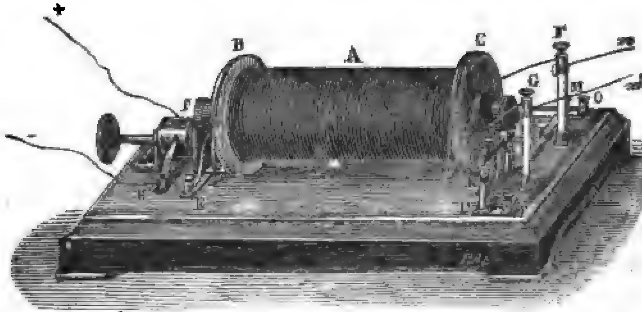
A afhangt, of de stroom al of niet gesloten is. Is die stand zoodanig, dat de veêren E en F beiden tegen metaal drukken, dan is de keten gesloten; komt echter de eene veêr tegen het metaal, de andere tegen de niet-geleidende stof, waarvan de schijf vervaardigd is, dan is de keten niet meer gesloten. Het is dus voldoende de schijf voortdurend om te draaijen, om den stroom telkens te sluiten en weder af te breken.

352. **Inductie-toestel van Ruhmkorff.** — De inductiestroom is, zooals wij hiervóór gezien hebben, slechts een oogenblikkelijke; men heeft echter herhaaldelijk naar middelen omgezien om dien stroom aanhoudend te maken; eene eerste poging daartoe werd in 1836 door Masson in het werk gesteld. Hij gebruikte tot afbreking van den stroom een getand metalen rad, welks tanden beurtelings in aanraking kwamen met eene metalen veêr. Door dit rad in verbinding te brengen met het eene uiteinde van den om eene klos spiraalvormig gewonden geleiddraad, terwijl de metalen veêr met een der pooldraden van de keten verbonden was, en het andere uiteinde van de spiraal met den anderen pooldraad gemeenschap had, werd bij het omdraaijen van het rad de keten onophoudelijk beurtelings gesloten en afgebroken. De daarbij ontstane inductiestroomen hadden eene vrij aanzienlijke spanning en vooral de physiologische werking bleek aanzienlijk te zijn. Deze toestellen hebben in lateren tijd allerhande wijzigingen ondergaan, vooral ook heeft men zich er op toegelegd om ze zoodanig te vervaardigen, dat zij bijzonder voor geneeskundig gebruik geschikt waren, waarvoor zij meer en meer in gebruik kwamen. Later (1842) vond Masson, dat deze toestellen ook zeer geschikt waren om electriciteit van zeer aanzienlijke spanning te geven, zoodat men daarmede een condensator kon laden en vooral de lichtverschijnselen duidelijk maken. De meest volmaakte toestellen van dien aard zijn echter die, welke sedert 1851 door Ruhmkorff te Parijs vervaardigd worden; wij zullen ons daarom tot de beschrijving van zoodanigen toestel bepalen.

De inductie-toestel van Ruhmkorff bestaat in de eerste plaats uit eene rol A (Fig. 326 en 327), ongeveer 3 palm lang; van binnen is deze vervaardigd uit bordpapier, waarom het geïsoleerde koperdraad gewonden wordt, terwijl aan de uiteinden zich twee glazen platen B en C bevinden. Om deze rol zijn twee koperdraden gewonden; de binnenste is ongeveer 2 strepen dik, met zijde omwonden en bovendien nog door eene laag schellak geïsoleerd; door dezen draad moet de stroom van de galvanische keten gaan; zijne uiteinden komen uit in twee openingen in de glazen platen B en C en zijn met de metalen zuiltjes D en E verbonden. Om dezen dikken draad is een eveneens

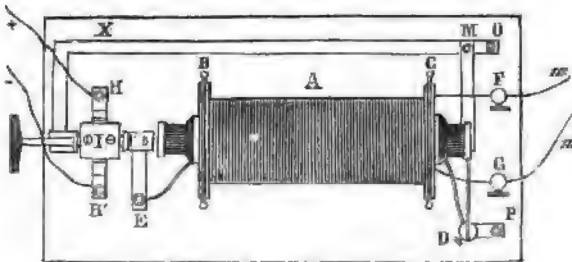
geïsoleerde koperdraad van $\frac{1}{4}$ streep dikte 25 tot 30 duizend malen gewonden. De beide uiteinden zijn bevestigd in de twee knopjes F en G, die door glazen

Fig. 326.



kolommetjes geïsoleerd zijn. Binnen in de inductierol bevindt zich een bundel ijzerdraden, aan wier uiteinden, die van weêrszijden buiten de rol uitsteken plaatjes week ijzer bevestigd zijn.

Fig. 327.

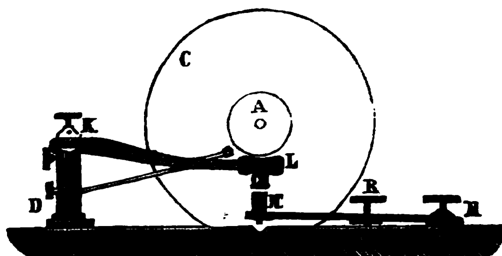


Aan den linkerkant van de rol bevinden zich twee knopjes H en H', waaraan de pooldraden van de galvanische keten bevestigd worden. Elk hunner is voorzien van eene koperen veêr, die tegen den zich daartusschen bevindenden commutator I aandrukt, welke juist zoo is ingerigt als de hiervoor beschrevene en in fig. 323 afgebeelde. Het eene metalen plaatje van den commutator is verbonden met het zuiltje E, het andere door de metalen reep X met de knopjes M en O.

Van het knopje M komt de stroom in den toestel, die in fig. 328 op grootere schaal en van ter zijde gezien is afgebeeld; C is de glazen plaat van de inductierol, A het uiteinde van den zich daarin bevindenden bundel ijzerdraad.

Aan het knopje M is een metalen staafje verbonden, op welks linker uiteinde een koperen cilindertje N bevestigd is, dat van boven van een plaatje van platina is voorzien. Juist daarboven, tusschen A en N, bevindt zich het regter uiteinde L van den hefboom KL, wiens andere uiteinde is verbonden met het kolommetje D, waarin de dikke koperdraad der inductierol uitkomt. L is een stuk week ijzer, dat van onderen met een plaatje van platina is voorzien, hetwelk juist boven dat op het cilindertje N uitkomt. Rust L op N, dan is de geleiding gesloten; de stroom, die bij H binnenkomt, gaat door het eene plaatje van den commutator en de metaalgeleiding X naar M, vervolgens door N, L en D, en van daar door den dikken koperdraad naar E; daarna treedt hij in het andere plaatje van den commutator, vanwaar hij door H′ naar de negatieve pool der keten stroomt. Door de werking van dien stroom wordt echter de ijzerdraadbundel magnetisch; L wordt dus aangetrokken, maar daardoor wordt tevens de stroom afgebroken. Ten gevolge van dit afbreken houdt de ijzeren bundel op magnetisch te zijn, en laat dus L weder vallen, tot het op N komt, en de keten dus weder gesloten wordt. Men zal inzien, dat de hefboom KL, die doorgaans de *hamer* genoemd wordt, daardoor eene heen- en weêrgaande beweging verkrijgt, die des te schielijker zal zijn, naarmate de afstand van L tot A en N geringer is. Door middel van de schroef R kan men dien afstand regelen en dus maken, dat de achtervolgende afbrekingen en sluitingen van de keten elkander schielijker of langzamer opvolgen.

Fig. 328.



Bij elke afbreking of sluiting van de keten wordt er in den dunnen koperdraad om de rol een inductiestroom opgewekt, bij afbreking in dezelfde, bij sluiting in de tegenovergestelde rigting van den hoofdstroom. Gebruikt men eene batterij van 4 of 5 Bunsen'sche elementen, dan zijn de inductiestroomen zoo sterk, dat men daarbij vonken van nagenoeg een halve duim verkrijgen kan tusschen twee dikke koperdraden, die met de in de kolommetjes F en G bevestigde koperdraden verbonden zijn.

Behalve de door inductie in het dunne koperdraad opgewekte oogenblikkelijke stroom, wordt er in den dikken draad zelven ook een extra-stroom

opgewekt; bij de afbreking toch door middel van den hamer KL duurt de inducerende stroom nog een oogenblik voort, zooals blijkt uit de vonk, die bij elke afwijking tusschen L en N wordt waargenomen. Om hierin te voorzien heeft Fizeau (1853) in de draadgeleiding van den hoofdstroom eenen condensator geplaatst, waarvan de eene metalen oppervlakte in verbinding is met den hamer L, de andere met het aanbeeld N. De vonken tusschen N en L worden daardoor veel zwakker, terwijl de stroomsterkte van den inductiestroom toeneemt, hetgeen blijkbaar is aan de vonken, die men in dat geval tusschen de draden *m* en *m'* kan verkrijgen, en die soms nagenoeg een duim lang zijn. De bij den toestel van Ruhmkorff gebruikte condensator bestaat uit eene aan weêrszijden met bladtin beplakte reep gewaste taf, ter lengte van ongeveer vier ellen, die in den houten voet van den toestel geborgen wordt, zoodat de eene metalen oppervlakte in verbinding is met het knopje O en dus ook met M en met het aanbeeld N, de andere met P en dus ook met den hamer L.

Op het oogenblik dat de hoofdstroom afgebroken wordt, begeven zich de beide tegenoverstelde electriciteiten van den extra-stroom op de beide tegenovergestelde oppervlakten van den condensator, waardoor de spanning in de punten L en N, en dus ook de sterkte van de aldaar ontstaande vonk, aanmerkelijk vermindert. Daar voorts de beide metaalbelegsels van den condensator met elkander gemeenschap hebben door den koperdraad en de verdere deelen van den toestel en de keten, zoo heeft er langs dezen weg eene vereeniging der tegenovergestelde electriciteiten plaats. De extra-stroom keert dus als 't ware terug, waardoor ook het magnetisme van den ijzeren bundel moet veranderen; door die verandering moet er tevens eene dubbele inducerende werking plaats hebben, waardoor die van den hoofdstroom nog vermeerderd wordt. Door deze plotselinge terugkeering van den extra-stroom wordt dus de totale inducerende werking en de spanning in de uiteinden van den draad aanzienlijk vermeerderd, hetgeen ten gevolge heeft, dat de vonken, die in den geïnduceerden draad worden waargenomen, veel aanzienlijker zijn. Eigenlijk worden zij dan ook niet waargenomen op het oogenblik, dat de stroom wordt afgebroken, maar zoodra de extra-stroom is teruggekeerd en als 't ware door de metaaloppervlakte van den condensator is teruggekaatst.

Masson (1853) heeft eene verbetering bij dezen toestel ingevoerd, waardoor men nog aanzienlijker vonken verkrijgt. Hij heeft namelijk een der draden *m* en *m'* in verbinding gebragt met de buitenste, den anderen met de binnenste bekleeding eener gewone Leidsche flesch. De vonken tusschen de beide uiteinden dier draden worden daardoor wel niet langer, maar als 't ware dikker, en gaan van een sterker knappen gepaard.

353. **Proeven met den inductie-toestel van Ruhmkorff.** — Het getal Bunsen'sche elementen bij den toestel van Ruhmkorff behoort doorgaans drie of vier te zijn. Meer dan zes moet men er in geen geval gebruiken; bij een sterkeren stroom zoude de spanning te aanzienlijk worden en de isolerende laag van het dunne koperdraad verbroken worden.

De verschijnselen, door den toestel van Ruhmkorff voortgebragt, zijn zeer indrukwekkend. Wij zullen er eenige van vermelden en wel in de eerste plaats de zoo prachtige lichtverschijnselen, waarvan reeds sprake is geweest, toen wij zoo even van de lengte der vonk tusschen de beide uiteinden van den geïnduceerden draad gewaagden.

Worden de beide uiteinden zoo ver van elkander gesteld, dat er geene vonk kan overspringen, dan vertoonen zich aan die uiteinden kleine lichtbundels, die echter slechts in het donker kunnen worden waargenomen. Brengt men den vinger bij den metalen toestel, waarin tot meerder gemak de uiteinden der pooldraden vastgeklemd zijn, dan springen er kleine vonkjes over, die een sterk stekend gevoel veroorzaken; die, welke worden waargenomen aan het uiteinde, dat onmiddellijk met de buitenste omwindingen in verbinding is, zijn sterker, waaruit blijkt, dat de spanning in dat gedeelte aanzienlijker is. Laat men ze op een electrometer overspringen, dan wordt deze geladen met zoodanige electriciteit, welke overeenkomt met de rigting van den inductiestroom op het oogenblik dat de hoofdstroom afgebroken wordt. Met een der polen van den inductie-toestel in aanraking gebragt, wordt de electrometer niet geladen, hetgeen daaraan is toe te schrijven, dat hij telkens, als de hoofdstroom gesloten of afgebroken wordt, met andere electriciteit geladen wordt. Dat zulks wel het geval is, wanneer men de vonken daarop laat overspringen, komt slechts daarvan, dat alleen de inductiestroom, bij het openen van de keten ontstaande, sterk genoeg is om vonken te geven. Eene Leidsche flesch kan op gelijke wijze als een electrometer door den inductie-toestel geladen worden.

Prachtig zijn de lichtverschijnselen die men waarneemt, als men de vonken in eene luchtledige ruimte laat overspringen. Men kan zich daartoe bedienen van het in fig. 329 afgebeelde electrische ei, hetzelfde waarvan ook reeds vroeger (252) gebruik is gemaakt voor de lichtverschijnselen der wrijvingselectriciteit. Brengt men het bovenste gedeelte A in verband met het eene, het onderste B met het andere uiteinde van den geïnduceerden draad, en maakt men den toestel zooveel mogelijk luchtledig, zoodat de drukking der daarin aanwezige lucht niet meer dan ééne, hoogstens twee strepen bedraagt, dan is, zoodra de inductie-toestel begint te werken, de negatieve

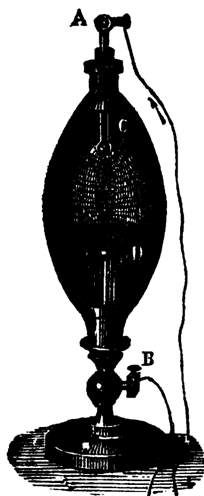


Fig. 329.

bol D omgeven met een donker blaauwachtig licht, terwijl van den positieven C een helder rood licht uitstroomt, dat zich bijna tot D uitstrekt. Het is geen doorgaand licht, doch is met donkere strepen afgebroken, zoodat het als 't ware achtervolgende lichtlagen zijn. Bijzonder duidelijk treedt dit verschijnsel te voorschijn, wanneer men vóór het luchtledig maken eenige druppels terpentijnolie, alcohol of zwavelether in het glas gedaan heeft; de zwarte streep, waardoor de negatieve pool D van het roode licht is afgescheiden, is dan vooral zeer duidelijk. Het is geen onafgebroken licht, maar het wordt als 't ware stootsgewijze door de positieve pool uitgestraald; door het schielijk opeenvolgen van de sluitingen en afbrekingen door den hamer LK in fig. 328 is het juist alsof het onafgebroken op dezelfde wijze voortschijnt. Sommigen zijn van oordeel, dat de afwisselende lichte en donkere strepen ook daaraan moeten worden toegeschreven, doch anderen meenen dit in twijfel te moeten trekken.

Door Geissler te Bonn worden glazen buizen vervaardigd, die met verschillende gassen gevuld zijn, en aan wier uiteinden platinadraden ingesmolten zijn, die met de uiteinden van den geïnduceerden draad in verbinding worden gebragt. Ook in deze worden dergelijke lichtverschijnselen waargenomen, die bovendien nog tot vele belangrijke onderzoekingen hebben aanleiding gegeven, vooral wat den aard van het voortgebragte licht aangaat. Daar de leer van het licht eerst in het volgend hoofdstuk zal behandeld worden, kunnen wij daarvan thans geene melding maken. Volgens de la Rive heeft het aldus ontstane licht ook magnetische eigenschappen, daar het om een magneet in eene bepaalde rigting draait.

Door de vonken van den inductie-toestel kunnen ook warmte-verschijnselen worden voortgebragt. Plaatst men tusschen de uiteinden van den geïnduceerden koperdraad een dun ijzerdraadje, dan wordt het gloeijend en zal zelfs smelten. De warmte-ontwikkeling aan de negatieve pool is veel grooter dan die aan de positieve.

Door den inductiestroom kan ook scheikundige werking volbragt worden. Daar echter deze stroomen tegelijk de eigenschappen van spannings- of wrijvings-electriciteit en die van dynamische electriciteit hebben, zoo zijn de electro-chemische verschijnselen ook meer zamengesteld. Grove (1853) vond, dat

men, naar gelang men den vorm der platina-electroden veranderde, ontleding van water kon doen plaats hebben aan ééne pool of aan beide polen; dat nu eens aan de eene pool zuurstof en aan de andere waterstof ontwikkeld werd, dan weder beide gassen aan beide polen ontstonden, terwijl in sommige gevallen geene ontleding werd waargenomen, doch alleen lichtverschijnselen in de vloeistof zelve. Becquerel vond dat, wanneer men de vonken deed overspringen in een van de buitenlucht volkomen afgesloten glazen bol, in wiens wand platinadraden ingesmolten waren, en die met dampkringslucht gevuld was, het stikstofgas zich met het zuurstofgas tot salpeterigzuur verbond.

Eindelijk moeten wij nog melding maken van de physiologische werking van de inductiestroomen. Deze is zoo hevig, dat wanneer men slechts twee Bunsen'sche elementen gebruikt, een konijn door den schok gedood kan worden. Daarom moet men bij het werken met zoodanigen toestel uiterst voorzigtig zijn, om niet met de beide uiteinden van den geïnduceerden draad in aanraking te komen, daar die schokken zoo al niet doodelijk toch stellig nadeelig voor het menschelijk ligchaam zijn.

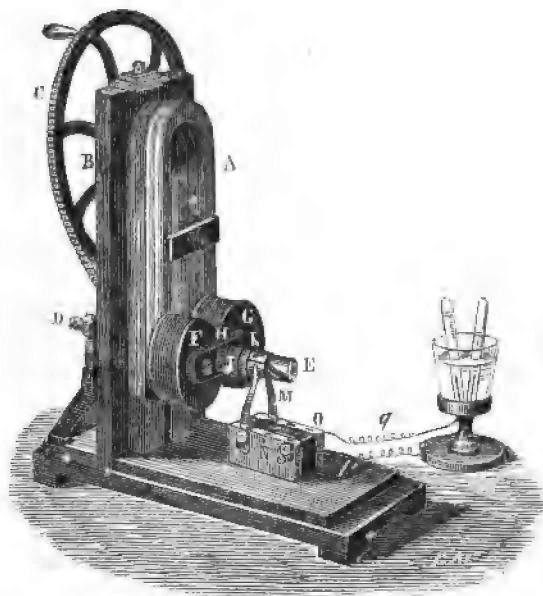
Men heeft zich in den laatsten tijd met zeer goeden uitslag bediend van de inductie-toestellen tot ontsteking van mijnen. De werking is geheel dezelfde, als hiervóór (286) is opgegeven, alleen met dat onderscheid, dat de vooral voor groote afstanden vereischte sterke galvanische batterij door een inductietoestel met een paar elementen kan worden vervangen.

354. **Magneto-electrische toestellen.** — Bij den inductie-toestel van Ruhmkorff heeft de inductie plaats door een galvanischen stroom; wij zullen nu eene andere soort van inductietoestellen leeren kennen, waarbij de inducerende werking door een magneet geschiedt. Zoodanige toestel is het eerst in 1832 door Pixii vervaardigd; later zijn er verschillende verbeteringen aangebragt door Saxton, Clarke, Stöhrer en anderen. Fig. 330 stelt een magneto-electrischen toestel van Clarke voor.

Dit werktuig bestaat uit een sterken magneet A, die op een plankje B bevestigd is. Aan de achterzijde van dit plankje bevindt zich een drijfwiel C met eene kruk; een riem zonder eind doet de zich daaronder bevindende as DE omdraaijen en met deze de klossen F en G. Deze klossen zijn vervaardigd van zeer dun met eene isolerende stof bedekt koperdraad; binnen in de klossen bevinden zich week ijzeren staven, die in den stand van fig. 330 juist tegenover de polen van den magneet uitkomen, en door eene koperen dwarsstaaf onderling verbonden zijn. De andere uiteinden van de zich in de klossen bevindende ijzeren staven zijn door een ijzeren dwarsstuk H

verbonden, dat in de figuur zigtbaar is, zoodat de twee staven daarmede als 't ware één stuk uitmaken. Elke klos is, zooals gezegd is, met geïsoleerd koperdraad omwonden, waarvan hij van 500 tot 1500 omwindingen bevat. De beide draden zijn door een hunner uiteinden verbonden, terwijl de andere uiteinden zijn vastgemaakt aan een koperen ring I, welke zich op de as bevindt, doch daarvan geïsoleerd is door een tusschenliggenden ivoren ring. De draden moeten om de beide klossen in verschillende rigtingen gewonden zijn; bevindt de toestel zich dan in den stand van fig. 330, zoodat de week ijzeren staven in de beide klossen juist tegenovergesteld magnetisch zijn, dan zal in de uiteinden de stroom dezelfde rigting hebben, zoodat deze onderling kunnen verbonden worden.

Fig 330.



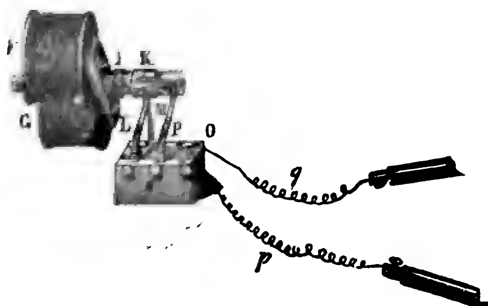
Wordt nu door het drijfwiel de as met de daarop bevestigde klossen in beweging gebragt, dan zal de stroom tengevolge van de nabijheid van eene andere pool van den magneet bij elke halve omwenteling van rigting veranderen. De stroomen hebben echter in de uiteinden, die aan I bevestigd zijn, beiden dezelfde rigting, terwijl ook bij beiden de rigting te gelijk verandert. Op de as is vóór den ring I een commutator K aangebragt, bestaande uit twee door ivoor van elkander gescheiden stukken metaal, waarvan het eene door eene metalen geleiding verbonden is met de metalen as, het andere met den ring I. Gedurende de omwenteling van de beide klossen zal dus iedere helft van den commutator als 't ware eene pool van den draad voorstellen, die echter

bij elke halve omwenteling van teeken verandert. Van de twee metalen plaatjes van den commutator gaat de stroom over op de koperen veêren L en M, en van deze op de koperen plaatjes N en O, waarin de koperdraden *p* en *q* bevestigd worden. Elke dezer veêren drukt achtervolgens tegen elk der metalen plaatjes van den commutator, zoodat zij beurtelings in verbinding zijn met de as en met I, of wat hetzelfde is, beurtelings met de verschillende uiteinden der om de klossen gewonden koperdraden. Brengt men dit in verband met de hierboven vermelde eigenschap, dat de rigting der stroomen bij elke halve omwenteling van teeken verandert, dan volgt er onmiddellijk uit, dat door elke der veêren L en M onophoudelijk een stroom gaat, wier rigting onveranderlijk dezelfde is.

Is de stroom, zoo als in fig. 330, door eenen voltameter gesloten, dan zal de scheikundige werking op de vloeistof geheel dezelfde zijn als die van een galvanischen stroom; aan de eene electrode vindt men slechts zuurstofgas, aan de andere alleen waterstofgas. Daar de spanning aanzienlijk moet zijn om den wederstand van de vloeistof in den voltameter te kunnen overwinnen, moeten in dit geval de draden om de klossen zeer lang en dun zijn.

Om eene sterke physiologische werking te verkrijgen moet de as eenigzins anders ingerigt zijn. Aan de beide metalen plaatjes van den commutator K zijn alsdan twee uitstekende en van elkander geïsoleerde reepen verbonden, waarvan er in fig. 331 een zigtbaar is bij het uiteinde van de as. Naast de veêr L bevindt zich dan nog eene derde veêr P, welke juist tegen die metalen reepen aankomt. In de metalen zijstukken N en O worden de draden *p* en *q* met de cilindertjes van koperblik vastgemaakt, die men in de hand neemt. Is de veêr P niet in aanraking met eene metalen reep op de as, dan gaat de stroom door het ligchaam van hem, die de beide cilinders in de hand houdt; zoodra echter P tegen een dier stukjes metaal aankomt, zal, daar L alsdan met het andere plaatje in aanraking is, de stroom door P en L gesloten zijn en dus niet meer door het ligchaam gaan; het is dan voor den waarnemer volkomen hetzelfde, als of de stroom afgebroken

Fig. 331.



werd. Zoodra de veêr P niet meer met het metalen reepje in aanraking is, gaat de stroom weder door het ligchaam, en men zal gemakkelijk begrijpen, dat hij dus gedurende elke omwenteling tweemaal wordt afgebroken en tweemaal wordt gesloten. Volgen deze sluitingen en afbrekingen, en dus ook de daaruit ontstaande extra-stroomen, elkander schielijk op, dan is de physiologische werking zeer sterk. Houdt men de cilinders alsdan in de vooraf vochtig gemaakte handen, dan gevoelt men zoodanige trekkingen, dat men de handen niet kan openen om ze los te laten. Met een zeer grooten toestel zoude de werking zoo al niet doodelijk, toch stellig nadeelig zijn.

Voor physische werkingen maakt men gebruik van klossen, waarvan de draad veel dikker is en niet langer dan 30 ellen. Om eene vonk te verkrijgen bevestigt men op de metalen as eene metalen naald, terwijl men alleen de veêr L gebruikt, na haar geleidend verbonden te hebben met een ijzeren bakje met kwikzilver. De polen zijn dan de oppervlakte van het kwikzilver en de op de as bevestigde naald; de vonk zal dus tusschen deze beide overspringen. Heeft men op het kwikzilver een weinig zwavelether of een ander ligt ontvlambaar vocht geschonken, dan wordt dat door de vonk aangestoken. Om een draad te gloeijen neemt men den toestel, zoo als hij in fig. 331 is afgebeeld, en bevestigt op de eene of andere wijze een platinadraad tusschen twee geleiders, die met de plaatjes N en O verbonden zijn. De beweging van de klossen moet echter zeer schielijk zijn om den platinadraad te doen gloeijen of smelten.

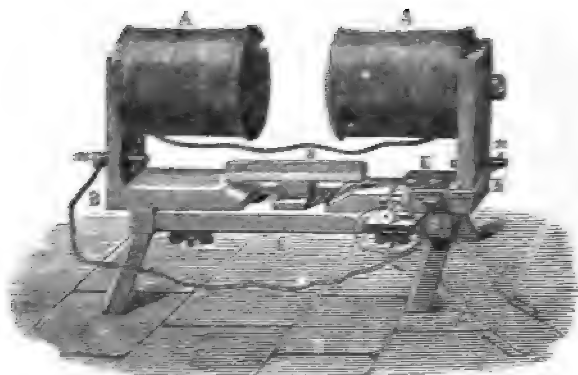
G. DIAMAGNETISME.

355. **Paramagnetische en diamagnetische ligchamen.** — Wij hebben hiervóór (301) reeds vermeld, dat de magnetische eigenschappen niet alleen bij het ijzer maar ook bij andere ligchamen worden aangetroffen, en dat terwijl ijzer en andere metalen door een magneet worden aangetrokken, sommige daarentegen door een sterken magneet worden afgestooten. Deze laatste eigenschap werd, voor zoo verre het bismuth aangaat, het eerst aangetoond door Brugmans in 1778; Coulomb (1802) ontdekte, dat goud, zilver, tin en andere ligchamen even als ijzer door een magneet worden aangetrokken. Faraday (1845) is echter de eerste geweest, die omtrent deze eigenschappen een bepaald onderzoek heeft in het werk gesteld, en niet alleen vaste ligchamen, maar ook vloeistoffen en gassen in dit opzigt heeft onderzocht. Hij heeft de magnetische ligchamen, dat zijn die, waarop de magneet invloed kan uitoefenen, in twee

worden verdeeld, namelijk de paramagnetische, die even als ijzer door een magneet worden aangetrokken, en de diamagnetische, die even als bismuth er door worden afgestooten.

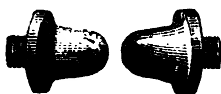
Ten einde de diamagnetische eigenschappen van de meeste stoffen te kunnen onderzoeken is een zeer krachtige magneet noodig. Men gebruikt daarom bij voorkeur eenen electromagneet, waaraan tevens die voorziening verbonden is, dat men het magnetisme kan doen ophouden wanneer men verkiest (1). Bij voorkeur rigt men den electromagneet in, zoo als in fig. 332 is afgebeeld.

Fig. 332.



A en A′ zijn twee met geïsoleerd koperdraad omwonden week ijzeren cilinders, die door middel van den ijzeren voet BCB′ met elkander gemeenschap hebben. De beide gedeelten B en B′ kunnen over C heengeschoven worden om den afstand tusschen A en A′ naar verlangen grooter of kleiner te maken; die afstand wordt door middel van het verdeeld liniaal D gemeten. De uiteinden *m* en *n* van den om den electromagneet gewonden koperdraad worden in verband gebragt met een commutator E, met behulp van welken men den stroom eener batterij, wier pooldraden *p* en *q* zijn, in de verlangde rigting door den draad kan doen gaan, of ook den stroom geheel kan afsluiten, zoodat hij niet door den draad gaat. Aan den binnenkant der beide klossen A en A′ schroeft men week ijzeren stukken van verschillenden vorm naar gelang van het doel,

(1) Men kan ook zeer wel gebruik maken van krachtige kunstmagneten. Faraday heeft vele onderzoekingen omtrent het diamagnetisme gedaan met een door Logeman vervaardigden magneet, die ruim 50 pond woog en meer dan 200 pond dragen kon.


Fig. 333.

dat men zich bij de proefneming voorstelt; de in fig. 333 afgebeelde worden doorgaans gebruikt, wanneer men de diamagnetische of paramagnetische eigenschappen van vaste ligchamen wil onderzoeken.

356. **Werking van een magneet op vaste ligchamen.** — Men kan de verschillende werkingen van een magneet op ijzer en op bismuth zeer duidelijk maken door de volgende, door Pouillet (1846) uitgedachte proef. Men neemt een hoefvormigen electromagneet en plaatst dien in vertikalen stand met de beide polen naar boven; daarop legt men een kaartpapier en laat daarop ijzervijlsel vallen, terwijl men het papier zachtjes schudt. Men zal dan, zoo als wij weten, bevinden, dat de deeltjes ijzer een bepaalden stand aannemen en zich op sommige punten, waar de aantrekking de aanzienlijkste is, het meest ophoopen. Neemt men echter bismuthpoeder in plaats van ijzervijlsel, dan vindt men, dat juist op die plaatsen, waar het ijzervijlsel zich het meest ophoopte, geen bismuthpoeder liggen blijft. Brengt men de polen van den in fig. 332 voorgestelden electromagneet, voorzien van de in fig. 333 afgebeelde poolstukken, digt bij elkander, en hangt men daarnevens een klein balletje van bismuth aan een zijden draad, dan wordt het blijkbaar afgestooten, zoodra men den stroom door de draadgeleiding laat gaan; een ijzeren balletje wordt daarentegen aangetrokken. Plaatst men de poolstukken verder van elkander en hangt men daartusschen een ijzeren staafje in horizontalen stand op, dan zal dit door den invloed van den magneet zich zoo plaatsen, dat de beide uiteinden naar de polen zijn toegekeerd; een bismuth staafje daarentegen plaatst zich zoodanig, dat het een regten hoek maakt met de lijn, die de beide polen verbindt. Hieruit blijkt dus ten duidelijkste, dat het ijzer wordt aangetrokken, doch het bismuth afgestooten.

Het zijn echter niet alleen ijzer en bismuth, welke deze tegenovergestelde eigenschappen vertoonen. Faraday heeft eene menigte stoffen onderzocht en heeft ze dientengevolge in twee soorten gerangschikt. Tot de paramagnetische behooren ijzer, nikkel, kobalt, mangaanmetaal, platina; tot de diamagnetische bismuth, antimonium, zink, tin, cadmium, sodium, kwikzilver, lood, zilver, koper, goud, arsenicum. Bij elk der hier opgenoemde metalen is de werking van den magneet sterker dan bij het daarop volgende. Tot de diamagnetische ligchamen moeten ook nog phosphorus, zwavel, was, glas en vele andere gebragt worden, die alle door de polen van een krachtigen magneet worden afgestooten.

357. **Werking van een magneet op vloeistoffen.** — Het onderzoek van vloeistoffen geschiedt het gemakkelijkst, door ze in kleine glazen buisjes te doen, en dan evenzoo tusschen de polen van den electromagneet op te hangen als de metalen staafjes. Plücker heeft de magnetische eigenschappen van vochten onderzocht door aan de beide klossen van den electromagneet poolstukken te verbinden van den in fig. 334 afgebeelden vorm, waarop hij een horologieglaasje plaatste met een paar druppels van het te onderzoeken vocht. Zoolang de stroom niet door de draadgeleiding gaat, behoudt de druppel zijne gewone cirkelvormige gedaante; zoodra echter het magnetisme begint te werken, verandert die gedaante; het vocht verheft zich op sommige plaatsen, terwijl het op andere als 't ware neêrgedrukt wordt. Fig. 335 stelt de doorsnede voor van de poolstukken met het horologieglaasje en den druppel, als het vocht paramagnetisch is; fig. 336 daarentegen wijst den vorm aan, dien de druppel van een diamagnetisch vocht aanneemt. Is er aantrekking, zooals in het eerste geval, dan hoopt het vocht zich op in de nabijheid van de polen; is er afstooting, dan heeft de ophooping tusschen de beide polen plaats.

Fig. 334.

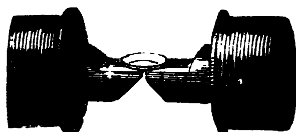


Fig. 335.

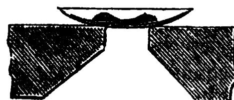
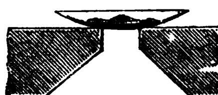


Fig. 336.



Men kan de magnetische eigenschappen ook nog op de volgende, zeer eenvoudige, door Quet (1854) uitgedachte wijze onderzoeken. Tusschen de beide poolstukken plaatst men over dwars eene aan beide uiteinden geopende glazen buis, waarin men een druppel van het te onderzoeken vocht heeft gedaan; men draagt voorts zorg de buis zoodanig te plaatsen, dat deze druppel zich niet tusschen de poolstukken bevindt, maar op zijde in hunne onmiddellijke nabijheid. Wordt nu de stroom gesloten, dan zal het kleine vochtkolommetje in de buis zich in beweging stellen; is de vloeistof paramagnetisch, dan begeeft het zich naar het midden, juist tusschen de beide poolstukken in; is zij diamagnetisch, dan verwijdert het er zich nog meer van. Dit geschiedt zelfs, wanneer de buis niet horizontaal, maar een weinig schuins is geplaatst, zoodat de beweging tegen de rigting van de zwaartekracht in moet plaats hebben.

Onder de vochten komen er eenige voor, die diamagnetisch, en andere,

die paramagnetisch zijn. Tot de eerstgenoemden behooren water, alcohol, zwavelkoolstof, eene oplossing van keukenzout; paramagnetisch zijn de oplossingen van kopérvitriool, van zwavelzuur nikkeloxyd en vooral de oplossingen van ijzerzouten.

358. **Werking van een magneet op gassen.** — Bancalari en Zantedeschi (1846) hebben het eerst waargenomen, dat de polen van een magneet eene afstootende werking uitoefenen op de vlam van eene kaars of eene lamp. Faraday (1847), Becquerel (1850) en Plücker (1852) hebben dezen invloed nader onderzocht, en zijn tot het besluit gekomen, dat de gassen evenzeer als de vaste ligchamen magnetische eigenschappen hebben, en kunnen verdeeld worden in paramagnetische en diamagnetische.

De proef met de vlam eener kaars kan men gemakkelijk herhalen met den in fig. 332 afgebeelden electromagneet, waaraan men de poolstukken van fig. 333 bevestigd heeft. Houdt men dan de vlam tusschen de beide polen, dan wordt zij, zoodra de stroom gesloten wordt, blijkbaar afgestooten, zoodat zij in plaats van omhoog gekeerd te zijn, aan weêrszijden afwijkt en als 't ware wordt plat gedrukt in eene rigting, loodregt op de lijn, die de polen verbindt.

Om de magnetische eigenschappen van verschillende gassen te onderzoeken kan men ze het best opsluiten, hetzij in zeepbellen, hetzij in zeer dunne glazen bolletjes. Becquerel maakte gebruik van de hiervóór (114) vermelde eigenschap van houtskool, van eene groote hoeveelheid gas te kunnen absorberen. Een klein cilindertje van houtskool werd geruimen tijd in een gas geplaatst en daarna tusschen de polen opgehangen. Uit de onderzoekingen is gebleken, dat zuurstof sterk paramagnetisch is, en dat de lucht, die uit zuurstof en stikstof bestaat, zulks in geringere mate is. Stikstofoxydul, koolzuurgas en ligt koolwaterstofgas zijn daarentegen diamagnetische ligchamen. Op waterstofgas en stikstofgas oefent de magneet geen merkbaren invloed uit.

359. **Invloed van de temperatuur en van de omringende middenstof op de magnetische eigenschappen der ligchamen.** — Bij de behandeling van de magnetische eigenschappen van het ijzer hebben wij reeds medegedeeld, dat de aantrekking nagenoeg geheel ophoudt, wanneer het gloeijend gemaakt wordt. Als regel kan men aannemen, dat bij alle paramagnetische ligchamen de aantrekking bij eene hoogere temperatuur veel geringer is; alleen bij platina schijnt de warmte geen of althans slechts

zeer geringen invloed uit te oefenen. Bij de diamagnetische wordt eveneens bij hoogere temperaturen eene minder sterke afstooting waargenomen; bij kwikzilver echter ondergaat die tusschen 0° en 300° geene vermindering.

Van veel gewigt is de invloed, welken de middenstof, waarin de ligchamen zich bevinden, op hunne magnetische eigenschappen uitoefent. Faraday (1846) heeft aangetoond, dat een ligchaam, dat in de eene middenstof paramagnetisch is, in eene andere diamagnetisch kan zijn. Bevindt een ligchaam, dat paramagnetisch is, zich in eene middenstof, welke sterkere paramagnetische eigenschappen heeft, dan verhoudt het zich ten opzigte van den magneet alsof het diamagnetisch is. Becquerel heeft door latere onderzoekingen dit bevestigd en daaruit afgeleid, dat eigenlijk geen ligchaam diamagnetisch genoemd mag worden, maar dat alle in meerdere of mindere mate paramagnetisch zijn. Daar echter bismuth en andere ligchamen in het luchtledige bijna even sterk door de polen van den magneet worden afgestooten als in de lucht, is dit beweren niet vrij van bedenking. Vooralsnog is het moeijelijk den aard der hier werkende krachten nader te omschrijven, en moet men dus liefst, in afwachting dat nadere onderzoekingen daarover meer licht zullen hebben verspreid, met Faraday aannemen, dat een magneet op twee verschillende wijzen, namelijk aantrekkend en afstootend, op de stof kan werken.

H. DIERLIJKE ELECTRICITEIT.

360. **Electrische visschen.** — Wij hebben hiervóór meermalen gewag gemaakt van den invloed, dien de statische electriciteit of een electrische stroom op het dierlijk ligchaam uitoefent. Onder sommige omstandigheden kan echter dat ligchaam zelf aanleiding geven tot ontwikkeling van electriciteit. Wij zullen die verschijnselen kortelijk nagaan.

Bij sommige visschen wordt eene zeer aanzienlijke ontwikkeling van electriciteit waargenomen; deze eigenschap was reeds in oude tijden bekend. Het sterkst treft men deze verschijnselen aan bij de sidder-rog of *Torpedo*, de beef-aal of *Gymnotus* en de sidder-wels of *Silurus*. Deze visschen zijn in het bezit van een orgaan, waarin de ontwikkeling van electriciteit plaats heeft, en waarmede zij naar willekeur stroomen van aanzienlijke kracht in eene bepaalde rigting doch van zeer korten duur kunnen opwekken. Raakt men eene dezer visschen aan, dan gevoelt men een hevigen schok. Davy

bragt metaaldraden in verbinding met den rug en den buik van eene sidderrog en nam in die draadgeleiding chemische, magnetische en warmte-verschijnselen waar, even als in den sluitdraad eener galvanische batterij. Bij deze dieren bestaat het electrische orgaan uit eene menigte naast elkander gelegene kolommetjes, die uit een dun vliesachtig celweefsel zijn zamengesteld.

361. **Kikvorsch-stroom, spier-stroom, zenuw-stroom.** — De ontdekking van het galvanisme door de proef met den kikvorsch (272) gaf later aanleiding dat men onderzocht, of welligt in den kikvorsch zelf niet een eigene electrische stroom was waar te nemen. Nobili, die zich het eerst met dit onderzoek heeft bezig gehouden, bevond, toen hij den bereiden kikvorschpoot met het eene uiteinde in een glas met water plaatste, terwijl de aan het andere uiteinde afhangende zenuwen in een ander daarnevens geplaatst glas gedompeld waren, en hij in elk dezer glazen een der uiteinden van den draad van een gevoeligen galvanometer bragt, dat deze aanstonds afweek en een stroom aanwees, die van het onderste naar het bovenste gedeelte van den kikvorschpoot ging. Door meerdere poten onderling te verbinden, even als de elementen eener batterij, verkreeg hij een sterkeren stroom, dien hij den eigen stroom van den kikvorsch of *kikvorsch-stroom* noemde.

Latere onderzoekingen van Matteucci en vooral van Du Bois Reymond hebben doen zien, dat zoodanige electrische stroomen niet alleen kunnen ontstaan in een kikvorschpoot, maar dat in alle spieren, alsmede in de zenuwen van het dierlijk ligchaam, zoodanige stroomen voorkomen Laatstgenoemde heeft er daarom den meer algemeenen naam van *spierstroom* of *zenuwstroom* aan gegeven.

Wanneer men een punt van de natuurlijke of door kunst gemaakte overlangs-doorsnede van eene spier of van eene zenuw en een willekeurig punt van de dwars-doorsnede zoo onderling verbindt door eene electrische geleiding, dat daardoor geene spanning ontstaat, dan vertoont zich in dien geleider een electrische stroom, die van het aanrakingspunt in de overlangs-doorsnede door den geleider naar het punt in de dwars-doorsnede gaat; door in dezen geleider een gevoeligen galvanometer te plaatsen, kan men zich van de aanwezigheid van zoodanigen stroom overtuigen.

Bij de zamentrekking van eene spier ondergaat deze stroom bepaalde veranderingen. Men kan die waarnemen, door elk der beide uiteinden van den draad eens galvanometers in een glas te plaatsen met water, waarin zout is opgelost, en dan in elk dier glazen eene hand of een vinger te houden. Zoodra men dan de eene hand of vinger sterk kromt en de spier eenigen tijd in dien

gespannen toestand laat blijven, wijkt de naald van den galvanometer af, ten bewijze dat een electrische stroom door het ligchaam en door de draadgeleiding gaat. De stroom wordt ook dan waargenomen, wanneer de wederstand, dien hij in de draadgeleiding ondervindt, zeer aanzienlijk is. Deze proeven kunnen alleen dan gelukken, wanneer men zich van eenen uiterst gevoeligen galvanometer bedient, welke minstens 6000 goed van elkander geïsoleerde omwindingen heeft. Aan de uiteinden van den draad bevestigt men bij voorkeur twee volkomen zuivere platinaplaatjes, die alsdan in het water, waarin eenig zout opgelost is, gedompeld worden. Ten einde de oppervlakte daarvan volkomen zuiver te houden, dompelt men de hand of vinger niet in deze zelfde glaasjes, maar in twee andere, die door met dergelijk water gevulde glazen buisjes met de eerstgenoemden verbonden zijn. Wil men eene spier of zenuw onderzoeken, dan plaatst men op den rand der glaasjes met vocht doortrokken pakjes vloeipapier, die tot in de vloeistof reiken, en legt de geprepareerde spier daar zoodanig op, als voor het in te stellen onderzoek noodig is.

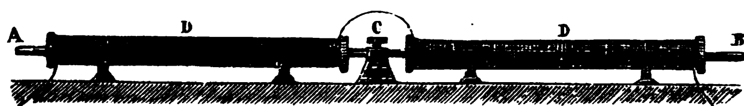
Omtrent de bijzondere eigenschappen dezer stroomen kunnen wij hier in geene verdere bijzonderheden treden, daar deze meer op het gebied der physiologie dan op dat der natuurkunde behooren.

I. TOEPASSINGEN DER ELECTRISCHE STROOMEN.

362. **Geluid voortgebragt door eenen galvanischen stroom.** — Wij hebben in de voorgaande afdeelingen van dit hoofdstuk nu en dan opmerkzaam gemaakt op sommige toepassingen van de eigenschappen der electriciteit. Ten besluite zullen wij nu nog op enkele gevolgen van die eigenschappen, alsmede op sommige toepassingen van uitgebreid belang, de aandacht vestigen.

In de eerste plaats verdient hier de het eerst door Page gedane waarneming vermeld te worden, dat wanneer ijzer door een galvanischen stroom magnetisch wordt, daarbij een eigenaardig geluid wordt waargenomen. Wanneer men eene lange cilindrische ijzeren staaf AB (Fig. 337) in het midden

Fig. 337.



C vastklemt, en om de beide helften, of om slechts eene, met geïsoleerd ko-

perdraad omwonden klossen D plaatst op zoodanige wijze, dat de assen van de klossen zamen vallen met de as van de staaf, dan zal er, wanneer men de uiteinden van den draad met de polen eener niet al te zwakke galvanische batterij verbindt, en door middel van een dergelijken toestel als de in fig. 328 afgebeelde den stroom telkens afbreekt en weder sluit, een toon worden waargenomen, en wel dezelfde, dien men zoude hooren, wanneer de staaf in longitudinale trillng gebragt wordt (147). De toon is dientengevolge onafhankelijk van de dikte der staaf; de meerdere of mindere snelheid der afbrekingen van den stroom is ook zonder invloed op de hoogte van den toon. Stalen staven geven zeer duidelijke en heldere toonen; staven van rood of geel koper, van zink of van glas, geven zelfs met eene sterke batterij geen toon. Is de staaf niet zoodanig geplaatst, dat hare as zamenvalt met die van de spiraal, waardoor de stoom gaat, dan is de toon minder zuiver, daar de longitudinale trillingen dan van transversale trillingen vergezeld gaan.

Wertheim heeft deze onderzoekingen herhaald met gespannen ijzer- en staaldraden van $\frac{1}{2}$ tot 3 strepen dikte, en heeft bevonden, dat bij zeer sterke spanning dezer draden of snaren een heldere toon ontstond, die bij geringere spanning echter van een ander geruisch vergezeld ging, waardoor hij minder helder werd. Bij draden van lood, tin, koper, zilver en platina nam hij geen toon waar.

Wanneer de stroom niet door middel van eene spiraal rondom de staaf geleid wordt, maar eenvoudig door de in de keten ingelaschte staaf gaat, dan neemt men eveneens een toon waar, wanneer de stroom beurtelings gesloten en afgebroken wordt. Deze is echter minder duidelijk dan die, welke in het eerste door ons vermelde geval ontstaat; bij dikkere staven is de toon minder sterk.

De oorzaak van het geluid schijnt te moeten worden gezocht in de trillingen, welke ontstaan door eene verlenging, welke de staaf ondervindt op het oogenblik dat zij magnetisch wordt; volgens de onderzoekingen van Joule bedraagt die verlenging bij eene ijzerstaaf, wanneer zij tot verzadiging toe magnetisch gemaakt is, $\frac{1}{270000}$ der lengte.

Poggendorff heeft ook op de volgende wijze een toon verkregen. Hij plaatste eene rol met de draadgeleiding in vertikalen stand, en daarom heen een cilinder van ijzerblik. Wanneer nu de door den draad gaande stroom beurtelings werd afgebroken en gesloten, dan ontstond er een duidelijke toon. Was het gebogen oppervlak van den cilinder geheel gesloten, dan was de toon echter minder sterk, dan wanneer er eene spleet in de rigting van de as in was. De hier waargenomene toonen schijnen veroorzaakt te worden door

inductiestroomen, die in den metalen cilinder ontstaan; dit is te meer waarschijnlijk, omdat die middelen, welke eene versterking van den inductiestroom veroorzaken, zoo als het plaatsen van een bundel van ijzerdraad in de rol, ook eene versterking van den toon ten gevolge hebben.

363. **Electriciteit als beweegkracht.** — Wij hebben hiervóór opmerkzaam gemaakt op het verband, dat er bestaat tusschen electriciteit en warmte, en hebben aangetoond, dat ook daar het beginsel van het behoud van arbeidsvermogen geldt. Wij mogen dus daaruit afleiden, dat de mogelijkheid moet bestaan om electriciteit om te zetten in mechanischen arbeid, dat is, om enkel door electrische stroomen een mechanischen arbeid te verrigten. Reeds voor het zoo even genoemde beginsel algemeen was aangenomen heeft het niet ontbroken aan pogingen om zoodanige toepassingen te maken; en hoewel deze niet tot zoodanige uitkomsten geleid hebben, dat in de praktijk daarvan reeds groot nut kan getrokken worden, zoo zullen wij toch hier de voornaamste wijzen vermelden, waarop electrische stroomen als beweegkracht kunnen worden aangewend.

Het eerste werktuig van dien aard was dat van dal Negro, welke een gewonen kunstmagneet liet heen en weêr schommelen tusschen de beide polen van een electromagneet, die bij elke schommeling van polariteit veranderde. De noordpool van den magneet werd aangetrokken door de zuidpool van den electromagneet, doch zoodra zij in de nabijheid daarvan gekomen was, veranderde de zuidpool in noodpool, en had er dus afstooting plaats. Het gebrek van dezen toestel en van vele andere van gelijken aard, die daarna zijn uitgedacht, was, dat de beweging slechts eene heen- en weêrgaande en geene ronddraaijende was. Jacobi is de eerste geweest, die eene doorgaande ronddraaijende beweging wist te bewerken. Zijn toestel bestond uit vier electromagneten, die vast op eene houten schijf bevestigd waren; tegenover deze bevonden zich vier andere electromagneten, welke bevestigd waren op eene dergelijke schijf, waaraan eene ronddraaijende beweging kon worden medegedeeld. Deze electromagneten waren zoodanig geplaatst, dat de polen van de vier laatstgenoemde zich juist bevonden tegenover de polen van de vier vaste electromagneten. Bij de vier vaste bleven de polen steeds dezelfde; bij de andere daarentegen veranderden zij gedurig. Neemt men nu aan, dat de polen van laatstgenoemde zich niet juist tegenover de polen der vaste magneten bevinden, dan zal er ten gevolge van de aantrekking der ongelijknamige polen eene beweging plaats hebben, die schielijker wordt, naarmate de afstand vermindert, omdat de aantrekking dan aanmerkelijk toeneemt. Op

het oogenblik echter, dat de ongelijknamige polen zich tegenover elkander bevinden, worden door een met den toestel in verband staanden commutator de polen der beweegbare electromagneten omgekeerd; de beweging blijft dus, ook ten gevolge van de verkregene snelheid, voortduren tot de polen, die ten gevolge van de omkeering nu gelijknamig geworden zijn, elkander zijn voorbij gegaan. Daar deze nu elkander afstooten, en dezelfde pool van den beweegbaren electromagneet daarentegen nu door de volgende pool van den vasten electromagneet wordt aangetrokken, zoo blijft de beweging volhouden en wel steeds in dezelfde rigting. Het komt er bij deze toestellen dus slechts op aan, dat de verandering der polen juist plaats heeft op het oogenblik, dat de gelijknamige polen zich tegenover elkander bevinden; dit geschiedt door middel van een met den toestel verbonden en bepaaldelijk voor dit doel ingerigten commutator.

Van meer belang zijn de toestellen, die niet, zoo als die van Jacobi, berusten op de eigenschap van magneten, dat gelijknamige polen elkander afstooten en ongelijknamige elkander aantrekken, maar op de eigenschap van eenen electromagneet, om week ijzer te kunnen aantrekken. Deze zijn hoofdzakelijk daarom te verkiezen, omdat de commutator minder zamengesteld behoeft te zijn, daar in dit geval geene omkeering van polen, maar alleen een beurtelings sluiten en afbrèken van den stroom moet plaats hebben. Bovendien leert de ondervinding, dat bij het beurtelings magnetisch en niet-magnetisch worden van eene ijzeren staaf door een electrischen stroom, eene sterkere ontwikkeling van magnetisme plaats heeft dan bij de gedurige omkeering der polen. Eindelijk ook kan de afstootende kracht van twee electromagneten van ongelijke afmetingen veranderen in eene aantrekking, daar de kleinste zich dan nagenoeg als eene week ijzeren staaf tot den grootsten en sterksten verhoudt; het is duidelijk, dat de werking dien ten gevolge geheel verkeerd zoude zijn.

Van de verschillende toestellen, wier inrigting op dit beginsel berust, verdient vooral de door Froment uitgedachte en in fig. 338 afgebeelde vermeld te worden. Deze bestaat uit vier vaste en sterke electromagneten A, die op een ijzeren voet BC bevestigd zijn, en waarom beurtelings een zelfde electrische stroom loopt. Op een beweegbaar ijzeren rad D bevinden zich acht week ijzeren staven E; komt eene dezer staven in de nabijheid van een electromagneet, dan wordt zij magnetisch; op het oogenblik echter, dat de staaf zich juist voor den electromagneet bevindt, wordt de stroom afgebroken en verliezen dus electromagneet en ijzeren staaf beide hunne magneetkracht. Het rad krijgt daardoor achtervolgens eene menigte schokken, welke tot eene snelle

en aanhoudende beweging aanleiding geven. De afbreking en sluiting van den stroom geschiedt op de volgende wijze. Voor aan den ijzeren voet bevindt zich een koperen halve cirkel FG, waaraan zich drie metalen armen H bevinden, van welke er in fig. 339 een afzonderlijk is voorgesteld. Deze bestaat uit twee metalen staafjes MN en OP, tusschen welke geen electrische gemeenschap bestaat, dan wanneer het rolletje R wordt opgeligt en de beide metalen cilindertjes bij N en P met elkander in aanraking komen. Altijd is één van deze staafjes in geleidende gemeenschap met den koperen halven cirkel, en door dezen en den draad I met eene der polen van de galvanische batterij, waarvan eene der pooldraden in het knopje K bevestigd wordt; het andere staafje in fig. 339 is in verbinding met den koperdraad, die, na om de electromagneten gewonden te zijn, aan de andere pool van de batterij verbonden is. Het opligten van het rolletje K is dus voldoende om den stroom te sluiten, de electromagneten magnetisch te maken, en deze op de ijzeren staven E eene aantrekking te doen uitoefenen; zoodra echter het rolletje weder neêrvalt, wordt de stroom afgebroken en houdt dus deze werking op. Het rolletje wordt opgeligt door de tanden van een getand rad L, dat zich op de as van het rad D bevindt. Twee van de drie in fig. 339 afgebeelde toestelletjes zijn in verbinding met de beide bovenste electromagneten; het

Fig. 338.

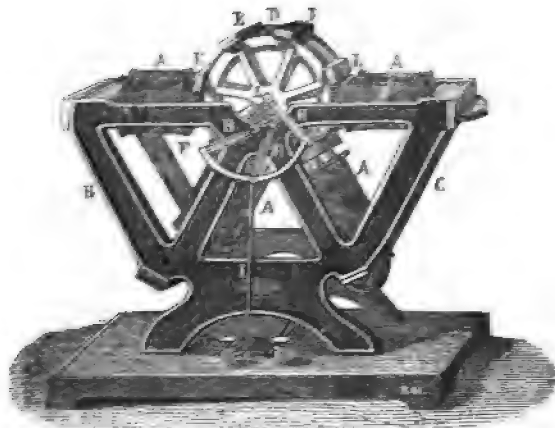
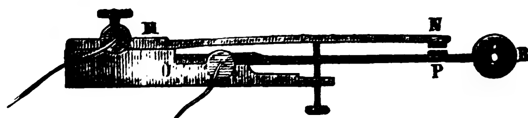


Fig. 339.



het derde dient voor de beide onderste. De magnetische toestand der staven E duurt slechts korten tijd, daar de vier electromagneten achtervolgens magnetisch worden in den tijd, welke verloopt tusschen het voorbijgaan van twee achtervolgende staven langs een zelfden electromagneet. Bij het afbreken van den stroom ontstaat er echter een extra-stroom, en bij gevolg springt er tusschen N en P, waar die afbreking plaats heeft, eene vonk over; dit werkt op den duur nadeelig, daar de met elkander in aanraking komende oppervlakvan N en P daardoor langzamerhand oxyderen. Froment heeft deze zwarigheid grootendeels uit den weg geruimd door de metalen armen H zoodanig te plaatsen, dat de stroom in den eenen niet wordt afgebroken, alvorens in den volgenden N en P met elkander in aanraking zijn. Daardoor wordt de stroom tot op de helft verminderd op het oogenblik dat hij wordt afgebroken; de door het eene gedeelte ontstaande extra-stroom is dus ook tweemaal minder sterk, en de vonk, door dien stroom ontstaan, verliest daardoor veel van haren nadeeligen invloed.

Door op de as van het rad D een tweede rad te bevestigen en dit door middel van een riem zonder eind in verband te brengen met een toestel, waarbij men de beweging wenscht over te brengen, kan men de electriciteit als nuttige beweegkracht aanwenden. Froment heeft een zoodanig werktuig van ééne paardenkracht vervaardigd.

Wij hebben zoo even reeds de opmerking gemaakt, dat deze soort van werktuigen weinig geschikt is om eene algemeene toepassing als bewegingswerktuigen te vinden. De voorname reden hiervan is gelegen in de kosten, welke veel aanzienlijker zijn dan die van een stoomwerktuig. Eene vergelijking laat zich gemakkelijk maken, wanneer men in aanmerking neemt, dat bij een stoomwerktuig het verbruik van brandstof, bij een electro-magnetisch werktuig het verbruik van zink in de galvanische keten de voorname kosten uitmaakt. Een pond steenkolen levert bij de verbranding 7600 warmte-eenheden, doch daar een aanmerkelijk gedeelte der ontwikkelde warmte, zooals wij hiervóór (232) gezien hebben, ongebruikt verloren gaat, mag men niet aannemen, dat een pond steenkolen gemiddeld meer dan 5 pond stoom levert, of dat er meer dan ongeveer 3000 warmte-eenheden op het water overgaan. Neemt men voorts in aanmerking, dat slechts een betrekkelijk klein gedeelte van die in den stoom ontwikkelde warmte in nuttigen arbeid wordt omgezet, en dat zelfs bij de voordeeligste werktuigen, die met hooge drukking en met expansie werken, de nuttige arbeid slechts $\frac{1}{7}$ van den theoretischen bedraagt (239), dan volgt daaruit, dat een pond steenkolen niet veel meer dan 400 warmte-eenheden of 170000 arbeids-eenheden oplevert. In de galvanische keten daarentegen worden door de verbinding van één pond zink met zuurstof en

zwavelzuur ongeveer 720 warmte-eenheden ontwikkeld: theoretisch zoude dus daardoor een arbeid van 720 × 425 of 306000 kilogrammeters kunnen volbragt worden. Uit de proeven van Joule en Scoresby is echter gebleken, dat de werkelijk verrigte arbeid niet meer bedraagt dan $\frac{5}{6}$ van den theoretischen, zoodat de door een pond zink in een galvanischen toestel verrigte arbeid nagenoeg 250000 eenheden zoude bedragen. Neemt men nu echter in aanmerking, dat een pond zink hier te lande ongeveer 20 maal meer kost dan een pond steenkolen, dan volgt hieruit, dat electriciteit als beweegkracht omstreeks 14 maal meer kost dan stoomkracht. Zoo lang men dus van de bij de galvanische keten gevormde zinkzouten geen gebruik in de nijverheid kan maken, waardoor deze eene waarde verkrijgen, die slechts weinig van die van het zink verschilt, zal men steeds met veel meer voordeel van den stoom als beweegkracht gebruik maken.

Nogtans verdient de galvanische stroom als beweegkracht in één opzigt boven de werking van den stoom verkozen te worden; men is namelijk daarbij aan geene plaats gebonden, maar kan door het oplossen van een stuk zink eene beweging doen plaats hebben op eene plaats, die mijlen ver van de galvanische batterij verwijderd is; vooral ook is het in vele gevallen nuttig, dat men de werking oogenblikkelijk kan doen plaats hebben enkel door den stroom te sluiten of af te breken. Het voordeel is dus niet gelegen in eene groote en voordeelige krachtsontwikkeling, maar alleen in de spoed, waarmede men die kracht kan doen werken, waar en wanneer men het verlangt. Wij zullen daarvan de bewijzen vinden bij de electrische telegrafen, waarvan wij straks eene beschrijving zullen geven.

Het verband tusschen electrische stroomen, warmte en mechanische beweegkracht, dat uit het voorgaande reeds overtuigend gebleken is, kan ook nog worden aangetoond door de volgende proef, door Foucault met een door hem uitgedachten toestel genomen. Tusschen de beide polen van eenen sterken, horizontaal geplaatsten electromagneet plaatste hij eene rood koperen schijf in dier voege, dat de as, waarom deze schijf draaijen kon, horizontaal was, en de schijf zelve slechts gedeeltelijk tusschen de beide poolstukken reikte. Door middel van een zamenstel van raderen en rondsels gaf hij aan deze schijf eene aanzienlijke snelheid, zoodat zij 200 omwentelingen in de seconde volbragt. De tegenstand, dien men daarbij ondervond, zoo lang de stroom niet door den om het week ijzer gewonden koperdraad ging, was slechts zeer gering; door de verkregene snelheid bleef de koperen schijf nog eenen geruimen tijd van zelve voortdraaijen. Zoodra men echter den stroom sloot, en dus het week ijzer tot een magneet maakte, hield de beweging der

schijf bijna onmiddellijk op; toen hij haar weder in beweging wilde brengen ondervond hij een aanmerkelijken tegenstand. Bij aanwending van grootere kracht kon echter de schijf weder in beweging gebragt worden, hoewel die niet zoo schielijk was als voor dat de keten gesloten was. Daarbij had echter eene aanzienlijke warmteontwikkeling in de schijf zelve plaats, die in drie minuten ruim 50° in temperatuur klom; de mechanische kracht werd dus hier in warmte omgezet. Met eene sterkere galvanische batterij was de tegenstand zoo aanzienlijk, dat men niet dan met veel krachtsinspanning en slechts gedurende eenen korten tijd de schijf in beweging kon brengen en houden.

364. **Telegrafen.** — Reeds in het laatst der voorgaande eeuw heeft men pogingen aangewend om van de wrijvings-electriciteit gebruik te maken ten einde op verre afstanden teekens over te brengen; deze pogingen bleven echter zonder gunstige uitkomsten, daar de vochtigheid van de lucht een te grooten invloed op de werking eener electriseer-machine uitoefent, om op eenen aanzienlijken afstand het een of ander teeken te kunnen overbrengen. De ontdekking van de galvanische keten en hare werking deed echter van die pogingen meer vruchten hopen. Sömmering (1811) stelde het eerst voor om door eene behoorlijk geïsoleerde draadgeleiding op eene op verren afstand gelegene plaats eene water-ontleding te doen plaats hebben. Onze landgenoot Vorsselman de Heer (1839) vervaardigde een telegraaf, waarbij van de physiologische werking van den electrischen stroom werd gebruik gemaakt. Hij liet daarbij den waarnemer, die zich op de plaats bevond waarheen men een berigt wenschte over te brengen, in een of meer zijner vingers, die hij alle op tien toetsen geplaatst had, een kleine schok gevoelen; door verschillende combinatien van de toetsen of van de vingers kon men de onderscheidene letters of teekens, waaromtrent men vooraf was overeengekomen, overseinen. Geen dezer telegrafen heeft echter in de praktijk toepassing gevonden. Eerst na de ontdekking van de werking der electrische stroomen op magneten en op week ijzer wist men toestellen te bedenken, welke door hunne eenvoudigheid geschikt waren om algemeen gebruikt te worden.

Wij zullen achtervolgens de drie soorten van telegrafen beschrijven, die thans nog gebruikt worden, te weten den naald-telegraaf, den wijzer-telegraaf en den druk-telegraaf.

365. **De naald-telegraaf.** — De naald-telegraaf is zeer eenvoudig ingerigt, daar hij eigenlijk slechts bestaat uit een galvanometer, waarvan de magneetnaald zich niet in horizontalen maar in vertikalen stand bevindt. In

fig. 340 is de toestel uitwendig afgebeeld; fig. 341 geeft een overzigt van de inwendige inrigting. AB is een galvanometer, zamengesteld uit een houten raam, waarom de geïsoleerde koperdraad is gewonden. Daar binnen bevindt zich de eene naald, terwijl de andere, welke daarmede onafscheidelijk verbonden is, zich aan den buitenkant bevindt, zoo als in fig. 340 bij *ab* is voorgesteld. Ter weêrszijden van de naald *ab* bevinden zich twee ivoren pennetjes *c* en *d*, om te beletten, dat de naald te veel ter regter- of ter linkerzijde uitslaat. De kruk *mn* is bevestigd op de as van den in fig. 341 afgebeelden cilinder COD, welke uit drie ge-

Fig. 340.

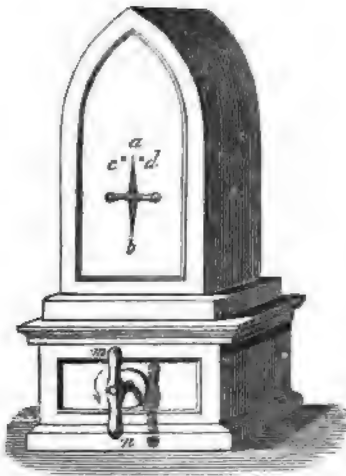
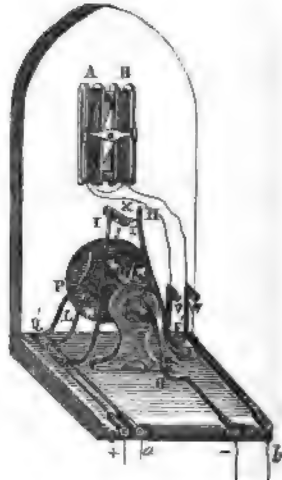


Fig. 341.



deelten is zamengesteld, de beide uiterste C en D van metaal, het middelste O van ivoor. Op de twee metalen cilinders C en D zijn twee metalen punten N en M bevestigd. De cilinder C, en dus ook de punt N, is door de koperon veêr P en de metalen reep QQ′ in geleidende gemeenschap met de positieve pool eener galvanische batterij; D, en dus ook de punt M, is door middel van den metalen tap van den cilinder, de veêr Z en de metalen reep GS in verbinding met de negatieve pool dier batterij. Bovendien bevinden zich aan elken kant van den cilinder twee veêren, waarvan het eerste paar onderling gemeenschap heeft door KER, welke met den grond in verbinding is; het an-

dere paar is verbonden door de reep FI, en door deze met den draad van den galvanometer, waarvan het andere uiteinde door WT met de gespannen draadgeleiding of telegraaflijn verbonden is. De twee veêren EI en FH drukken in hun gewonen stand tegen de twee metalen punten *x* en *y*, die op een koperen cilindertje X bevestigd zijn. De metalen punt M is zoodanig geplaatst, dat zij bij het omdraaijen van den cilinder COD tegen eene der veêren EI of FH kan drukken; aan de punt N is daarentegen een zoodanige stand gegeven, dat zij tegen de veêr L of tegen de in onze afbeelding ter naauwernood zigtbare veêr J kan drukken. In den toestand van rust, waarin men den toestel moet plaatsen, wanneer men een sein zal ontvangen, heeft de kruk *mn* den in fig. 340 aangewezen stand, waardoor ook de cilinder COD zich in den stand van fig. 341 bevindt, zoodat de beide punten M en N tegen geene der vier veêren aandrukken. De stroom, die van de lijn T komt, gaat dus door den galvanometer en daarna door de veêr FH, de punten *x* en *y* en de veêr IE naar den grond. De cilinder COD bevindt zich dus buiten de draadgeleiding, en de persoon, die het sein ontvangt, heeft alleen na te gaan, of de naald *ab* (Fig. 340) ter regter- of ter linkerzijde afwijkt.

Moet hij zelf een sein geven, dan bedient hij zich van den zoo even beschreven cilinder COD. Door de kruk *mn* om te draaijen in de rigting van het pijltje komt de punt M tegen de veêr FH aan, terwijl N tegen L drukt; de gemeenschap tusschen FH en IE, waarvan de eerste nu niet meer tegen *x* aandrukt, heeft dus opgehouden. De positieve pool der batterij is dan in verbinding met den grond door tusschenkomst van QQ′, de veêr P, den cilinder C en de veêr L; de negatieve pool daarentegen is in gemeenschap met de lijn door middel van de veêr GZ, den cilinder D, de veêr HF, den galvanometer en de geleiding WT. De stroom gaat dus door den galvanometer en doet de naald afwijken in dezelfde rigting, waarin men de kruk *mn* bewogen heeft. Draait men dezen in tegenovergestelde rigting, dan komt de punt N tegen de veêr J, en M tegen de veêr EI; de gemeenschap bij *y* wordt dus afgebroken; de negatieve pool is dan in verbinding met den grond, en de positieve met den galvanometer en de lijn. De stroom, die gesloten is door den grond, gaat dus in tegenovergestelde rigting door den galvanometer en doet de naald ook naar den anderen kant afwijken. Bij eenen galvanometer, die zich aan het andere station in dezelfde draadgeleiding bevindt, zal men dus dezelfde afwijking waarnemen, als daar waar men het sein geeft.

Men zal inzien, dat men de achtervolgende regtsche en linksche afwijkin-

gen der naald gemakkelijk op eene afgesprokene wijze kan verbinden, om daaraan de beteekenis van letters te geven. Zoo duiden bijv. twee afwijkingen links de letter A aan, drie afwijkingen links B, vier links C, eene regtsche en twee linksche E, en zoo verder, zooals zulks vooraf is bepaald geworden. Tot meerder gemak zijn die teekens ter regter- en linkerzijde van de naald op de in fig. 340 voorgestelde kast afgebeeld.

De naald-telegrafen zijn zeer gevoelig en vereischen geen sterken stroom; maar ook vreemde invloed, zooals bijv. de lucht-electriciteit, kan tot eene afwijking van de naald aanleiding geven. Het aflezen der teekens, hoewel niet moeijelijk, kan ligt tot vergissingen leiden. Het is om deze redenen, dat men van deze soort van toestellen slechts zelden meer gebruik maakt.

Wij hebben bij de beschrijving van dezen telegraaf aangenomen, dat er slechts één draad van het eene station naar het andere gespannen is, en dat de sluiting van de keten door de aarde plaats heeft. Vroeger achtte men twee draden noodzakelijk tot eene volkomene sluiting van de keten, doch Steinheil (1838) heeft het eerst aangetoond, dat men een der draden door den grond vervangen kon, die dan als geleider der electriciteit dient, indien aan de beide uiteinden groote koperen platen bevestigd zijn, die in den vochtigen grond gegraven worden. Men moet dit echter niet zoodanig opvatten, alsof de aarde hier hetzelfde doet als een geleiddraad; zij dient om als eene groote verzamelplaats de aan de eene pool van de keten afgeleide electriciteit op te nemen. Zoolang namelijk de eene pool, bijv. de negatieve, met den grond verbonden is, gaat de positieve electriciteit voort door eenen draad, hoe lang die ook zijn moge, mits het eene uiteinde met de positieve pool en het andere met den grond verbonden is. Houdt echter de gemeenschap van de negatieve pool met den grond op, dan kan de negatieve electriciteit niet wegstroomen; zij bindt dus de positieve van de andere pool en maakt het ontstaan van een stroom onmogelijk.

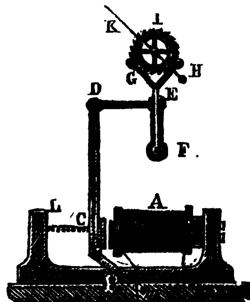
De geleiddraad wordt doorgaans op houten palen bevestigd, welke van toestellen van gebakken aardewerk, *isolatoren* genoemd, voorzien zijn. Somtijds wordt hij ook onder den grond gelegd, maar moet dan behoorlijk geïsoleerd zijn. Te dien einde wordt hij met gutta-percha overtrokken en in ijzeren buizen besloten.

366. **De wijzer-telegraaf.** — Door wijzer-telegrafen verstaat men die, waarbij een wijzer zich langs eene wijzerplaat beweegt, op wier omtrek zich letters of andere teekens bevinden, in dier voege, dat men hem naar willekeur een oogenblik kan doen stilstaan bij de letter of het teeken, dat men

wil seinen. Wheatstone (1840) is de eerste geweest, die zoodanigen telegraaf heeft vervaardigd; later zijn er door Froment en anderen verschillende wijzigingen in gemaakt. Op enkele plaatsen zijn zij nog in gebruik, onder anderen sedert 1845 aan de stations van den Hollandschen spoorweg, waar zij eenigzins gewijzigd zijn door E. Wenckebach. Wij zullen van deze toestellen eene beschrijving geven, doch vooraf het beginsel aantoonen, waarop de werking berust.

Terwijl de naald-telegraaf hoofdzakelijk uit een galvanometer bestaat, is bij den wijzer-telegraaf een electromagneet het voorname bestanddeel. Fig. 342 kan daarvan een denkbeeld geven. A is een electromagneet; *m* en *n* zijn de uiteinden van den om het week ijzer gewonden draad, en worden met de polen der batterij in verbinding gebragt. Ter zijde van den electromagneet bevindt zich een hefboom BCD, bij C van een stuk week ijzer voorzien; het steunpunt van den hefboom bevindt zich bij B. Wordt nu door het sluiten van de keten het ijzer van den electromagneet magnetisch, dan wordt het stuk ijzer C en dus de geheele hefboom BCD aangetrokken; houdt A op magnetisch te zijn tengevolge van het afbreken van den stroom, dan wordt BCD door de veêr L weder van A afgetrokken. Het uiteinde D van den hefboom verkrijgt dus, door het sluiten en openen van de keten, eene heen en weêrgaande beweging, welke door het staafje DE wordt medegedeeld aan EF; bij F bevindt zich eene horizontale as, waarop het anker FGH bevestigd is, dat bij G en H voorzien is van twee pennetjes, die beurtelings ingrijpen tusschen de tanden van het schakelrad I. Dit rad staat in verband met andere raderen en wordt door een gewigt rondgedraaid, wanneer de pennetjes G en H zulks niet beletten. Men zal inzien, dat het rad I telkens, als de stroom wordt afgebroken en weder gesloten, een tand vooruitspringt, en dat dus de op de as van I bevestigde wijzer K eveneens vooruitgaat.

Fig. 342.



Bij de wijzer-telegrafen van den Hollandschen spoorweg bestaat de toestel uit twee gedeelten, den seingever en den seinontvanger. Beide zijn in één toestel vereenigd, dat in fig. 343 van boven en in fig. 344 van terzijde gezien is afgebeeld; in de eerste figuur is de seinontvanger, in de tweede de seingever eenvoudigheidshalve weggelaten. Het gewigt A brengt een stel van raderen in beweging, waardoor ook een rad met pennen B ronddraait, op de

as van dit rad bevindt zich de wijzer M (Fig. 343). In de pennen van B grijpt een anker C in, dat op eene dergelijke wijze, als wij zoo even beschreven hebben, in beweging gebragt wordt door het aantrekken en loslaten van het stuk week ijzer E door den electromagneet D. Bij iedere beweging van den hefboom EC gaat B ééne pen vooruit, en wijst de wijzer M op de wijzerplaat eene volgende letter aan. De seingever bestaat uit eene metalen as GH, die door een zich in haar midden bevindend ivoren schijfje I in twee stukken verdeeld is, welke geene onmiddellijke geleidende gemeenschap onderling hebben. De as GH wordt door middel van eene kruk K rondgedraaid. Aan de linkerzijde van deze as bevinden zich twee metalen veêren L en L′, die steeds tegen de twee van elkander gescheiden deelen van de as aandrukken, en waarvan de eene L steeds met de positieve, de andere L′ met de negatieve pool eener galvanische batterij verbonden is. Aan de regterzijde van de as bevinden zich vier veêren, N, O, P en R, waarvan N steeds geleidend met P verbonden is en O met R. De as GH is zoodanig ingerigt, dat altijd twee dezer veêren, maar ook niet meer dan twee, met haar in aanraking zijn, namelijk, zoo als in onze afbeelding N en R, of, als hij door middel van de kruk K half omgedraaid wordt, O en P. De onderling verbonden veêren O en R zijn verbonden met den grond door de geleiding p; de veêren N en P door den draad q met den om den electromagneet D gewonden koperdraad.

Fig. 343.

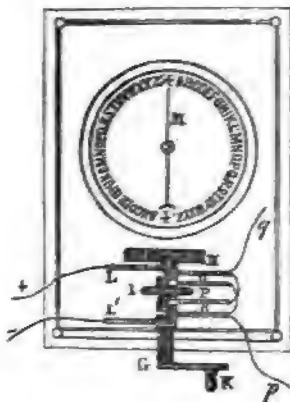
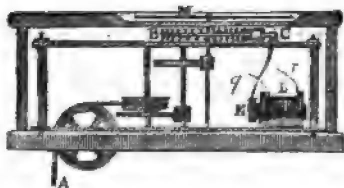


Fig. 344.



Op elk der twee kantoren bevindt zich eene even sterke batterij. In den toestand van rust, dat is, als er niet geseind wordt, is de verbinding zoodanig, dat de beide uiteinden van de telegraaflijn met gelijknamige polen ver-

bonden zijn; fig. 345 geeft daarvan eene voorstelling. KZ en *KZ* (1) zijn de twee batterijen, waarvan de negatieve polen Z en *Z* bij A en *A* met den grond verbonden zijn, terwijl de positieve K en *K* met de lijn B gemeenschap hebben; men heeft hier dus twee even sterke doch in tegenovergestelde rigting loopende stroomen, die elkander vernietigen. Begeert men te seinen, dan moeten door den seingever de polen van de eene batterij omgekeerd worden, zoodat de stand wordt, zooals in fig. 346 is voorgesteld; de beide stroomen loopen dan in dezelfde rigting, en doen dezelfde werking als een stroom van dubbele sterkte.

Fig. 345.

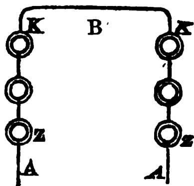
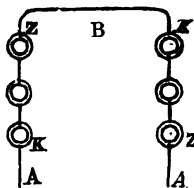


Fig. 346.



Wil men gaan seinen, dan draait het kantoor, dat het berigt moet overbrengen, den seingever GH zoodanig om, dat de stroomen der beide batterijen in dezelfde rigting loopen, en geeft een teeken, dat terstond op het andere kantoor vernomen wordt. De stroom van het seingevend kantoor loopt nu van de batterij naar L′ door het voorste gedeelte der as, door P, vervolgens om den electromagneet D en langs de lijn r naar het andere kantoor; aldaar gaat hij verder eveneens om den electromagneet *D*, vervolgens door *N*, het achterste gedeelte *H* van de as en de veêr *L* naar de batterij en van daar door *L′*, *R* en *p* naar den grond. De stroom van het seinontvangende kantoor gaat door *L*, *N*, den electromagneet *D*, de draadgeleidiug of lijn *r*, naar het seingevend kantoor; aldaar loopt hij door den electromagneet D naar N (de seingever is omgedraaid, zoodat N niet met de as verbonden is) en P, het voorste gedeelte der as, de veêr L′ en de batterij. Zoodra de stroomen elkander niet meer vernietigen, worden op beide kantoren de stukken ijzer E door de electromagneten D aangetrokken, beweegt zich het rad B en dus ook de wijzer M, die, zoo hij bij het begin bij de letter **A** stond, nu bij **B** komt te staan. Wil men de letter **B** aanwijzen, dan wacht men een oogenblik, ten einde het andere kantoor te doen begrijpen, dat die letter bedoeld was. Wil men daarna **E** seinen, dan beweegt het seingevende kantoor door de kruk K de as driemaal spoedig na elkander, en wacht dan een oogenblik; dan zijn wel achtervolgens

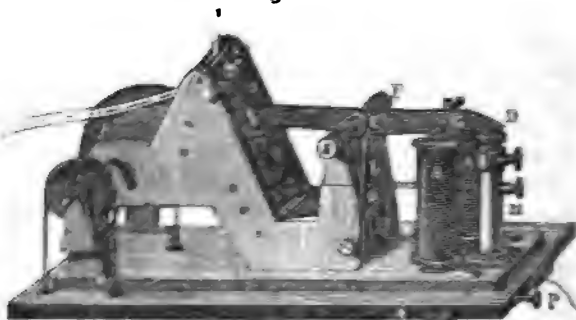
(1) Gemakshalve en om verwarring voor te komen zijn verder bij deze beschrijving dezelfde gedeelten van den toestel op de beide kantoren met dezelfde letters aangeduid, doch voor het seingevend kantoor met staande letters (K, Z, D, N, enz.), voor het seinontvangend kantoor met cursieve letters (*K*, *Z*, *D*, *N*, enz.).

C, D en E aangewezen, maar daar men bij de twee eerstgenoemden niet gerust heeft, is het duidelijk dat E bedoeld wordt. Op de wijzerplaat bevinden zich gemakshalve twee alphabets, alsook cijfers; wil men deze laatste seinen, dan geeft men vooraf een afgesproken teeken.

367. De druk-telegraaf. — De zoo even beschreven wijzer-telegraaf is thans nagenoeg overal vervangen door den druk- of schrijf-telegraaf van Morse, waaraan verscheidene voordeelen verbonden zijn, welke terstond in het oog zullen vallen bij de beschrijving van dezen ook in ons land bij den rijks-telegraaf in gebruik zijnde toestel.

De telegraaf van Morse bestaat hoofdzakelijk uit twee gedeelten, namelijk dat, waarmede het sein wordt gegeven, en dat, waarmede het berigt wordt ontvangen. Laatstgenoemde is afgebeeld in fig. 347: de seingever, ook wel sleutel genoemd, in fig. 348. De toestel, waarmede het berigt wordt ontvangen, bestaat in de eerste plaats uit een electromagneet AA; door de daarom

Fig. 347.



gewonden draadgeleiding gaat de stroom van het andere station, die, zoo als wij later zien zullen, door middel van den in fig. 348 afgebeelden toestel kan worden afgebroken of gesloten; BCD is een geelkoperen hefboom, zijn steunpunt hebbende in de as EF, en bij G voorzien van een week ijzeren staafje, waarvan de uiteinden juist boven de polen van den electromagneet uitkomen. Aan het andere uiteinde B van den hefboom bevindt zich een stiftje H, dat naar verkiezen hooger en lager kan gesteld worden. Onder aan den hefboom bevindt zich eene lip L, welke door eene spiraalveêr met het kolommetje M verbonden is. De bewegingen van den hefboom zijn binnen zeer enge grenzen beperkt, in de eerste plaats door eene punt boven in het kolommetje M, in de

tweede plaats door eene punt in het dwarsstuk O, waartegen de lip L aankomt. Bij N zijn twee rollen, waartusschen zich eene smalle strook papier bevindt; deze rollen worden door een gewigt, dat op een zamenstel van raderen werkt, in beweging gebragt, zoodat de papierstrook langzaam voortschuift. Wanneer er niet geseind wordt, kan men dit raderwerk laten stilstaan door op den knop P te drukken. De werking van dezen toestel is zeer eenvoudig. Wordt de electromagneet magnetisch, dan wordt het staafje G aangetrokken en dus het uiteinde B van den hefboom BCD met het daaraan bevestigde stiftje H opgeligt en tegen de papierstrook aangedrukt, waarop het dan, daar deze voortgaat, eene langere of kortere streep maakt, naarmate het langer of korter daartegen aangedrukt wordt. Ten einde deze streep duidelijker te maken bevindt zich op de rol N eene kleine groef, juist daar waar het stiftje tegen het papier aankomt. Wordt de stroom afgebroken, dan houdt de aantrekking bij G op, en wordt de hefboom door de werking van de spiraalveêr aan L van den electromagneet afgetrokken; het stiftje H drukt dan ook niet langer tegen het papier. Het staafje G mag niet met den electromagneet in aanraking komen, daar het in dit geval niet spoedig genoeg zoude losgelaten worden, als de stroom afgebroken wordt; men kan dit regelen, door de punt van het kolommetje M door middel van de daaraan verbondene schroef wat hooger te zetten.

In plaats van het stiftje langere en kortere lijnen op het papier te laten teekenen of drukken, laat men het enkel lijnen en stippen maken. De laatste ontstaan, wanneer de stroom slechts een oogenblik door den electromagneet gaat, de eerste wanneer de werking iets langer duurt. Door verschillende combinatien van stippen en lijntjes heeft men een genoegzaam aantal teekens bedacht, om alle letters van het alphabet, de cijfers en eenige andere teekens aan te duiden. Zoo beduidt bijv. eene enkele stip de letter *e*, twee stippen de *i*, eene stip en een lijntje de *a*, een lijntje en eene stip de *n*, een enkel lijntje de *t*, enz. Tusschen twee achtervolgende letters laat men eene grootere tusschenruimte, daar er anders verwarring zoude ontstaan.

Als seingever dient, zooals reeds is gezegd, de in fig. 348 afgebeelde sleutel. Deze bestaat uit een geelkoperen hefboom ABC met een houten knop A, welke zich beweegt om eene stalen spil B, die bevestigd is op de stijltjes D. Onder den hefboom bevindt zich eene stalen veêr E, die hem steeds naar boven drukt, tot het uiteinde C in aanraking is met het van de stijltjes geïsoleerde platina puntje K, dat in geleidende verbinding is met het kolommetje L; drukt men daarentegen op de knop A, dan komt het uitstekende platina puntje F in aanraking met het metalen aanbeeldje of kegeltje G, dat in ge-

leidende verbinding is met het knopje H. De geleiddraad p is verbonden met dit knopje H en dus met het aanbeeldje G; de draad r met het knopje L, dat met het platina puntje K, en in den toestand van rust met den hefboom ABC verbonden is; wordt deze neêrgedrukt, zoodat F en G met elkander in aanraking komen, dan gaat de stroom van p door G en ABC naar q; houdt die aanraking op, dan wordt hij afgebroken. De draad p in het knopje H is verbonden met de positieve pool der batterij; de draad q gaat naar de draadgeleiding, die naar het andere kantoor geleidt. In het kolommetje L bevindt zich een draad r, die zich in tweeën splitst, en waarvan de eene gaat naar de negatieve pool der batterij, de andere naar den om den electromagneet gewonden draad, waarvan het andere uiteinde met den grond verbonden is. Fig. 349 geeft eene eenvoudige voorstelling van die inrigting. S en S′ zijn daar de sleutels, M en M′ de electromagneten en B en B′ de batterijen, op de twee verschillende kantoren ge-

Fig. 348.

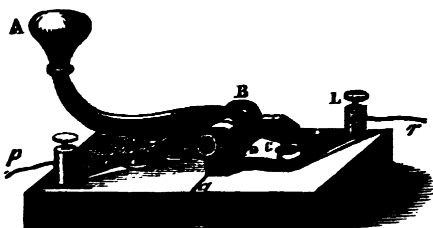
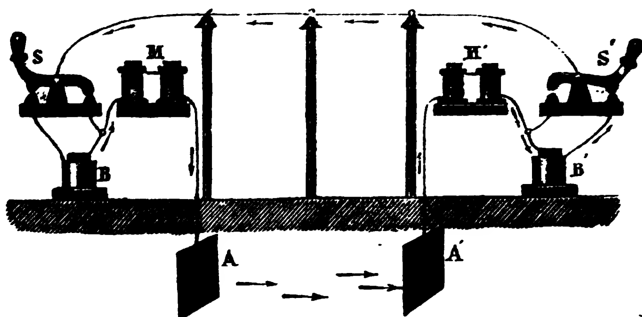


Fig. 349.

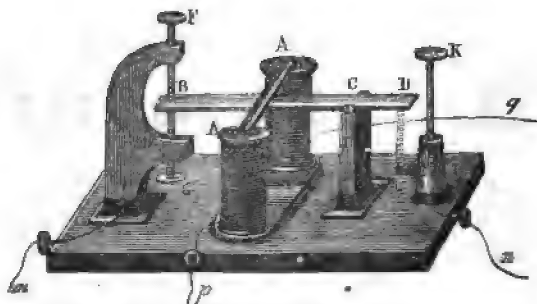


plaatst. Stellen wij nu dat de sleutel S in den toestand van rust blijft, zooals in de figuur, doch dat op het andere kantoor de sleutel S′ wordt neêrgedrukt, dan loopt er een stroom van de positieve pool der batterij B′, wier nega-

tieve pool door de draadgeleiding om den electromagneet M′ met den grond verbonden is, door den sleutel S′, de lijn, den sleutel S en den electromagneet M naar den grond. De seinen, door den sleutel S′ gegeven, worden dus door den met den electromagneet M verbonden druktoestel ontvangen. Bovendien gaat de stroom ook om den electromagneet M′, die dus dezelfde teekens kan mededeelen; de batterij B daarentegen blijft buiten den stroom, daar wel de eene pool met de geleiding verbonden is, maar de andere niet.

De ondervinding heeft echter geleerd, dat men, om den toestel in beweging te brengen, een vrij sterken stroom noodig heeft; een zwakke stroom doet den electromagneet het ijzeren staafje niet met voldoende kracht aantrekken, en drukt dus ook het stiftje niet genoeg tegen het papier aan, om daarop duidelijke teekens te verkrijgen. Om evenwel het gebruik van buitengewoon sterke batterijen te vermijden maakt men gebruik van een toestel, door Steinheil uitgedacht en het *relais* genoemd. Deze bestaat uit een electromagneet A (Fig. 350), waarvan de uiteinden *p* en *q* van de draadomwinding met de lijn verbonden zijn, zoodat, wanneer op het andere kantoor de stroom door middel van den sleutel gesloten wordt, niet de electromagneet van den druktoestel maar deze, namelijk die van het relais, magnetisch wordt. Boven dezen bevindt zich een ligte hefboom BCD, die om een bij C bevestigde spil beweegbaar is en voorzien is van een week ijzeren staafje HH, dat zich juist boven den electromagneet bevindt, en dus door dezen kan worden aangetrokken. Het uiteinde D is van eene spiraalveêr voorzien, wier uiteinde verbonden is aan een staafje E, dat in het kolommetje I uitkomt, en door middel van de schroef K hooger of lager gesteld kan worden. Het andere uiteinde B kan zich bewegen tusschen de beide punten van de schroeven F en G; het is aan de bovenzijde van een isolerend plaatje voorzien, zoodat er, wanneer het met F in aanraking is, geen geleidende verbinding plaats heeft, doch wel als het G aanraakt, hetgeen telkens het geval zal zijn als HH door den electromagneet wordt aangetrokken. De drie stijltjes M, L

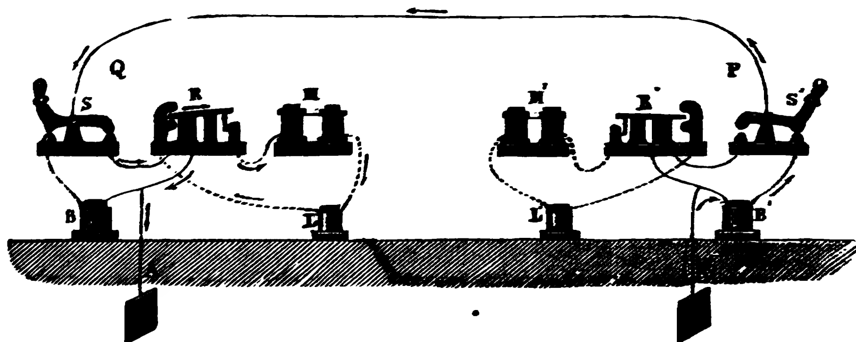
Fig. 350.



en I rusten op ivoren plaatjes: door die onder M en I gaan echter koperdraden, die bij *n* en *s* uitkomen. Een stroom, die bij *s* binnenkomt, volgt dus achtervolgens het staafje E, de spiraalveêr, den hefboom DCB, en gaat vervolgens, zoo HH door den electromagneet aangetrokken wordt, en B dus met de metalen punt van de schroef G in aanraking is, door M naar den draad *r*.

Komt nu bij *p* de stroom van het andere kantoor binnen, dan zal deze, al is hij ook zwak, toch in staat zijn om aan den electromagneet A eene genoegzame hoeveelheid magneetkracht mede te deelen om den hefboom BCD in beweging te brengen. Om den druktoestel in beweging te brengen dient eene afzonderlijke batterij van 3 of 4 elementen, *lokaalbatterij* genoemd, die zich aan het kantoor zelf bevindt, en waarvan de positieve pool verbonden is met den draad *s*: de stroom van deze batterij gaat dus langs den zoo even beschrevenen weg door het relais, welk hij bij *r* verlaat om van daar door den druktoestel te gaan. Fig. 351 geeft een overzigt van al de toestellen op de beide kantoren. S en S′ zijn de sleutels, M en M′ de electromagneten van de druktoestellen, R en R′ de beide relais, B en B′ de groote batterijen, L en L′ de lokaalbatterijen. Wil men nu van het kantoor P naar Q seinen, dan drukt men op den sleutel S′; de stroom der batterij B′ gaat dan door den sleutel S′, de lijn en den zich in rust bevindenden sleutel S,

Fig. 351.



verder om den electromagneet van het relais R naar den grond bij A, zooals zulks door de pijltjes is aangewezen. Daar de electromagneet van R nu magnetisch is geworden, wordt de hefboom van dezen aangetrokken; de stroom van de lokaalbatterij L wordt dus gesloten en gaat langs de in fig. 351 met gestippelde lijnen aangewezen draadgeleiding van de positieve

pool der batterij L naar het relais R, door den hefboom en de spiraal, en verder door de draadomwinding van den electromagneet M naar de negatieve pool der lokaalbatterij L, zoo als door de pijltjes is aangewezen. Wil men van het kantoor P seinen, dan moet op den sleutel S gedrukt worden; men zal zich gemakkelijk kunnen voorstellen, hoe in dat geval de werking is.

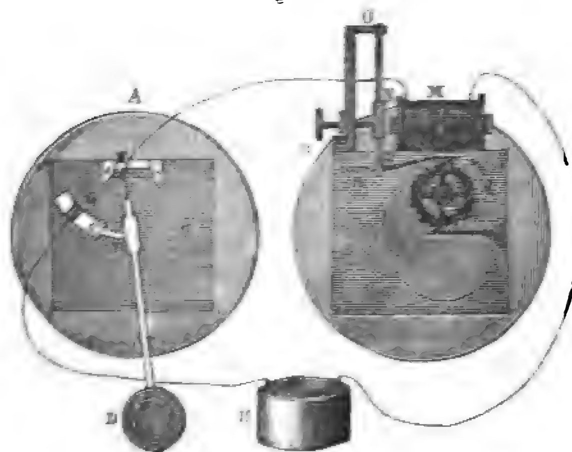
Bij de telegraaftoestellen in Nederland worden batterijen van Daniell gebruikt. Het zuur bestaat uit één deel zwavelzuur op omstreeks 50 deelen water.

368. **Electrische uurwerken.** — Men heeft van de electrische stroomen of eigenlijk van electromagneten gebruik gemaakt bij de uurwerken; deze toepassing was van tweeledigen aard. In de eerste plaats gebruikte men electromagneten als beweegkracht en stelde dus een electromagneet in de plaats van het gewigt of van de veêr, ten einde de verschillende raderen en daardoor de wijzers in beweging te brengen. Deze soort van toestellen moeten echter uit den aard der zaak minder volledig zijn, daar verandering in stroomsterkte verandering in de electromagnetische aantrekkende kracht moet ten gevolge hebben, hetgeen op de beweging van het uurwerk zelf van invloed moet zijn.

Van meer belang is de tweede toepassing, die men van de electrische stroomen bij de uurwerken gemaakt heeft, en welke daarin bestaat, dat men de aanwijzingen van een uurwerk, van welks naauwkeurigen gang men zich overtuigd heeft, door middel van eene draadgeleiding overbrengt op andere wijzerplaten, zoodat allen volkomen hetzelfde uur aanwijzen. Van de verschillende inrigtingen, welke men heeft uitgedacht om dit denkbeeld te verwezenlijken, zullen wij hier alleen die van Bain (1840) beschrijven, waarvan fig. 352 eene afbeelding geeft. A is het uurwerk, dat geregeld is, B dat, waarop men de aanwijzingen van het eerste wil overbrengen, beide van achteren gezien. In de kast C bevinden zich de verschillende raderen, D is de slinger, welke in E opgehangen is. Deze slinger is bij F voorzien van eene zeer ligte metalen veêr, die bij elke slingering aankomt tegen een metalen plaatje G, waarin een der pooldraden van de galvanische batterij H bevestigd is. Aan het metalen plaatje E, waar de metalen slinger opgehangen is, wordt een koperdraad vastgemaakt, die, na om den electromagneet M gewonden te zijn, met de andere pool der batterij verbonden is. De stroom zal dus gesloten worden, wanneer F tegen G aankomt, doch wordt afgebroken, zoodra deze verbinding ophoudt. Bij den electromagneet bevindt zich een hefboom, welke zijn steunpunt in O heeft, en bij N van een stukje week ijzer voorzien is; is dus de stroom gesloten, dan wordt N aangetrokken; de aan den hef-

boom verbonden pal wordt naar den regterkant bewogen en grijpt in een volgenden tand van het schakelrad Q in. Wordt de stroom weder afgebroken, dan wordt N losgelaten, en P door de spiraalveêr R teruggetrokken. Het rad Q is dus een tand vooruitgegaan in de rigtidg van het pijltje. Door dit rad met andere getande raderen te verbinden (in de figuur eenvoudigheidshalve door eirkels voorgesteld), kan men aan de wijzers op de wijzerplaat van B volkomen dezelfde beweging mededeelen, als die van de wijzers op A.

Fig. 352.



369. **Snelheid van de electriciteit.** — Wheatstone heeft in 1834 getracht de voortplantingssnelheid van de statische electriciteit in metaaldraden bepalen. Zonder hier in eene beschrijving te treden van de door hem daarbij gevolgde wijze van onderzoek, bepalen wij ons mede te deelen, dat die snelheid volgens hem, in een geelkoperen draad van 2 strepen dikte, 450000 Ned. mijlen (kilometers) in de seconde bedraagt.

Proefnemingen, door middel van telegraafdraden in het werk gesteld door Walker in Amerika en door Fizeau in Frankrijk (1850), hebben tot andere uitkomsten geleid. Walker vond voor de voortplantingssnelheid van den galvanischen stroom in de van ijzer vervaardigde telegraafdraden tusschen Washington en St. Louis niet meer dan 30000 kilometers. Dit verschil laat zich niet daardoor verklaren, dat de geleidingswederstand in ijzer ongeveer zesmaal grooter is dan koper, want de draden in Amerika waren nagenoeg driemaal dikker; was de oorzaak dus alleen in den draad te zoeken, dan zoude de door Walker gevondene voortplantingssnelheid ongeveer de helft van de door Wheatstone gevondene moeten bedragen. Fizeau heeft daarentegen gevonden, dat de snelheid in een ijzerdraad van $4\frac{1}{2}$ streep 101700 ki-

lometers bedraagt, en in een koperdraad van $2\frac{1}{2}$ streep 177700 kilometers, dat de zamenstelling der batterij op de voortplantingssnelheid geen invloed uitoefent, en dat de snelheden in verschillende geleiders niet evenredig zijn aan hunne geleidbaarheid voor electriciteit.

Neemt men voorts in aanmerking, dat waarnemingen tusschen Greenwich en Edimburg geleid hebben tot eene snelheid van slechts 12200 kilometers in de seconde, en dergelijke waarnemingen tusschen Greenwich en Brussel tot de nog geringere waarde van slechts 4300 kilometers, dan komt men tot het besluit, dat het vooralsnog niet mogelijk is de voortplantingssnelheid der electriciteit met eenige naauwkeurigheid op te geven.



HOOFDSTUK IX.

LICHT.

A. AARD, VOORTPLANTING EN STERKTE VAN HET LICHT.

370. **Hypothesen aangaande den aard van het licht.** — Licht noemen wij datgene, waardoor wij in staat gesteld zijn de voorwerpen te zien; even als warmte kan het niet op zich zelf bestaan, maar is onafscheidelijk van de stof; wel is de voortplanting door het luchtledige mogelijk, zoowls wij ook voor de warmte bevonden hebben, maar zonder stof kan geen licht ontstaan, noch waargenomen worden.

Men kan niet met volkomene zekerheid zeggen, welke eigenlijk de ware aard van het licht is. Van de twee hypothesen, uitgedacht om daarvan, in verband met de verschijnselen, eene verklaring te geven, wordt echter de eene thans algemeen aangenomen. Wij zullen van beide een kort begrip trachten te geven.

Volgens de eerste en oudste theorie, gewoonlijk de *emanatie-* of *emissie-theorie* genoemd, is het licht eene fijne stof, die door de lichtgevende ligchamen met groote snelheid uitgezonden wordt; deze deeltjes worden ondersteld zoo fijn te zijn, dat zij niet aan de werking der zwaartekracht onderworpen zijn. Het is vooral Newton geweest, die deze theorie ontwikkeld en door haar de verschillende hem bekende lichtverschijnselen verklaard heeft. Ook later heeft deze theorie nog aanhangers gevonden, die getracht hebben haar in verband te brengen met later ontdekte verschijnselen; daartoe moest men echter aan die uiterst fijne en toch stoffelijke lichtdeeltjes meer en meer zamengestelde eigenschappen toeschrijven, terwijl sommige verschijnselen in het geheel geene verklaring konden vinden.

De andere theorie wordt doorgaans de *undulatie-* of *trillings-theorie* genoemd. Volgens haar is de geheele ruimte vervuld met eene uiterst fijne, veêrkrachtige stof, die men *ether* noemt, en welke onderworpen is aan de inertie en aan de

wetten van de trillende beweging van veêrkrachtige stoffen, en wier digtheid kan toenemen en afnemen. Is de ether in rust, dan bemerkt men geen licht; de trillingen van den ether maken echter op ons gezigt den indruk van licht; een lichtgevend p unt is dus een punt, dat den ether in trilling brengt. Deze trillingen worden naar alle kanten voortgeplant, even als de trillingen van de lucht, die op ons gehoorzintuig den indruk van geluid maken, zich ook naar alle kanten verspreiden door middel van zoogenaamde spherische golven. Het verschil tusschen de luchttrillingen van het geluid en de ethertrillingen van het licht is daarin gelegen, dat laatstgenoemde niet, zoo als die van het geluid, loodregt gerigt zijn op het oppervlak van de golf, maar loodregt op de rigting, volgens welke het licht wordt voortgeplant; het zijn dus *transversaal-trillingen.* Even als bij het geluid hooge en lage toonen door een verschillend aantal trillingen in eene zelfde tijdseenheid ontstaan, zoo is ook bij het licht het verschillend getal der trillingen oorzaak van de verschillende kleuren. Bovendien hebben de ethertrillingen bij het licht veel schielijker plaats dan de luchttrillingen bij het geluid.

Deze theorie is, wat het hoofdbeginsel aangaat, uitgedacht door Descartes, doch door onzen landgenoot Chr. Huygens (1690) het eerst op wetenschappelijke gronden ontwikkeld en met de verschijnselen in verband gebragt. Na hem vond zij, vooral door het gezag van Newton, minder verdedigers dan de emanatie-theorie, doch is later, toen eerst Young en later vooral Fresnel aantoonden, hoe sommige later ontdekte verschijnselen volkomen met haar overeenkwamen, doch in de emanatie-theorie geene verklaring konden vinden, voor goed gevestigd, zoodat thans alle natuurkundigen haar als de ware beschouwen. Wij zullen later bij de behandeling van sommige lichtverschijnselen nog nader op deze theorie terugkomen.

371. **Lichtbronnen.** — Door natuurlijke lichtbronnen of lichtgevende ligchamen verstaat men die, welke uit hen zelven licht geven, zoo als de zon en de vaste sterren. Andere geven ook wel licht van zich, maar zij ontleenen dit aan andere ligchamen, en kaatsen het daarna terug naar ons oog, waardoor zij voor ons zigtbaar worden; dit is het geval met de maan, de planeten en met alle voorwerpen die ons omringen.

Behalve de natuurlijke lichtbronnen, die altijd en onophoudelijk licht afgeven of uitstralen, moeten ook nog die vermeld worden, die tijdelijk als zoodanig mogen beschouwd worden. Deze kunnen weder onderscheiden worden in door kunst voortgebragte, zooals die, welke ontstaan door meer of min aanzienlijke verhooging der temperatuur, en in natuurlijke, waartoe alle ver-

schijnselen van de zoogenaamde phosphorescentie moeten gebragt worden. Alle ligchamen geven bij temperatuur-verhooging licht van zich; men kan over het algemeen aannemen, dat zij deze eigenschap bij eene temperatuur van 500 tot 600 graden verkrijgen. Het gemakkelijkst middel om lichtbronnen door kunst voort te brengen is de verbranding, vooral van gassen of van ligchamen, bij wier verbranding of verwarming gassen ontwikkeld worden, zooals vetten en olien.

Door *phosphorescentie* verstaat men de eigenschap van sommige ligchamen om een zwak licht van zich te geven, zonder eene merkbare ontwikkeling van warmte. Somtijds moet het licht daarbij worden toegeschreven aan eene scheikundige werking, zooals onder anderen bij den phosphorus het geval is, die zich langzamerhand met de zuurstof van de lucht tot phosphorzuur verbindt; ook bij rottend hout en bij sommige dierlijke stoffen, vooral bij doode visschen, waarbij phosphorescentie wordt waargenomen, wordt deze door meer of min ingewikkelde scheikundige werking veroorzaakt. Het zoogenaamde phosphoresceren van de zee moet worden toegeschreven aan kleine diertjes, die of zelven licht van zich geven, of eene lichtgevende stof van zich afscheiden. Sommige dieren, zooals bij ons de algemeen bekende glimworm, verspreiden ook licht; tot dusverre heeft men echter de ware oorzaak van dit verschijnsel niet met zekerheid kunnen aanwijzen.

Ligchamen, die geen licht van zich geven, noemt men donker; laten zij het licht door en kan men zelfs de voorwerpen er door heen onderscheiden, zooals gewoon glas, dan heeten zij doorzigtig; laten zij licht door, doch kan men geene voorwerpen er door zien, zoo als mat glas, geolied papier, enz., dan noemt men ze doorschijnend. Die, welke volstrekt geen licht doorlaten, zoo als de metalen en de meeste voorwerpen, die ons omringen, heeten ondoorschijnend. Worden deze tot zeer dunne plaatjes geslagen, dan kunnen zij toch nog eenig licht doorlaten; goudblad bijv. laat een groen licht door; het is echter de vraag, of dit licht wel door de stof zelve en niet door de tusschenruimten tusschen de stofdeeltjes wordt doorgelaten.

In verband met de trillings-theorie moet men deze eigenschappen zoodanig opvatten, dat de trillingen van den licht-ether zich ook in de ligchamen voortplanten, en de etherdeeltjes, welke zich tusschen de atomen dier ligchamen bevinden, in trilling brengen. Bij de doorzigtige en doorschijnende ligchamen wordt die trilling ook aan de andere zijde van het ligchaam verder voortgeplant; bij de ondoorschijnende heeft die verdere voortplanting niet plaats; daarentegen worden daar de trillingen grootendeels aan de oppervlakte teruggekaatst, even als dit ook voor het geluid plaats heeft.

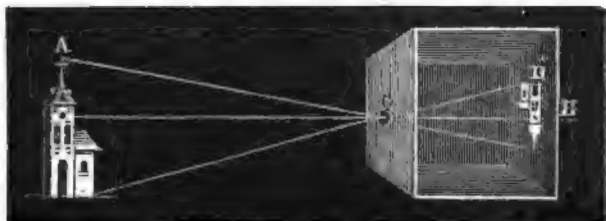
372. **Voortplanting van het licht.** — De rigting, volgens welke het licht zich voortplant, noemt men een *lichtstraal;* een lichtstraal is dus eigenlijk niet iets stoffelijks, maar slechts eene lijn. Gaan verscheidene lichtstralen uit van eene zelfde bron, dan noemt men die eenen *lichtbundel.* Loopen de stralen van eenen lichtbundel allen in dezelfde rigting, dan noemt men ze evenwijdig; loopen zij uiteen, dan heeten zij *divergerend;* naderen zij meer en meer tot elkander, dan noemt men ze *convergerend.*

Wanneer de middenstof, waarin het licht zich voortplant, homogeen, dat is over al dezelfde en van gelijke digtheid is, dan heeft die voortplanting volgens eene regte lijn plaats. Door een ondoorschijnend voorwerp tusschen eene lichtbron en ons oog te plaatsen, worden wij verhinderd het voorwerp te zien; dit zoude niet het geval wezen, zoo het licht van de lichtbron niet volgens eene regte lijn tot ons oog kwam. Duidelijk is dit ook, wanneer men een lichtstraal door eene opening in een venster in eene donkere kamer laat vallen, waarin stof zwevende is; men kan dan duidelijk de rigting van het invallende licht aan die stofdeeltjes waarnemen.

Is de middenstof, waardoor het licht voortgeplant wordt, niet homogeen, dan is de rigting niet regtlijnig. Later zullen wij leeren, welke afwijkingen alsdan moeten plaats hebben.

373. **Voortplanting van het licht door naauwe openingen.** — Bij de zoo even vermelde proef van de lichtstralen, welke in eene nagenoeg donkere kamer vielen, hebben wij alleen onze aandacht gevestigd op de rigting dier stralen. Is de opening, waardoor het licht binnen gelaten wordt, zeer naauw, dan zijn daarbij nog andere verrassende verschijnselen waar te nemen, die echter ook hare verklaring vinden in de regtlijnige voortplanting van het licht, alsmede in de eigenschap, dat van alle punten van een lichtgevend ligchaam in alle rigtingen lichtstralen uitgaan.

Fig. 353.

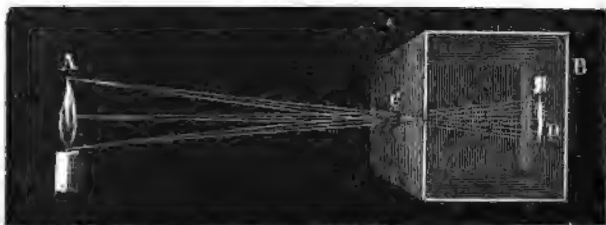


Zij A (Fig. 353) een verlicht en dus lichtgevend voorwerp, bijv. een ge-

bouw, en B eene donkere kamer, waarin eene kleine opening C gemaakt is, dan zal men, wanneer de wand D tegenover de opening C wit of althans helder is, daartegen een kleiner en omgekeerd beeld van dat voorwerp waarnemen, onverschillig welke de gedaante der opening is, mits zij slechts klein zij. De oorzaak van dit verschijnsel is, dat de regtlijnige van verschillende punten van A uitgaande lichtstralen elkander in de opening C kruisen en volgens de in de figuur aangewezene rigtingen tegen den wand D aankomen, waar zij dus een beeld moeten vormen, gelijkvormig met het voorwerp zelf, doch kleiner in de verhouding van de afstanden van de opening C tot A en tot D.

Dat de gedaante der naauwe opening niets ter zake doet, laat zich op de volgende wijze verklaren. Van elk punt van het lichtgevend voorwerp gaat een divergerende lichtbundel uit, die op den wand van de donkere kamer een beeld werpt, gelijkvormig aan de gedaante der opening. Daar echter van elk punt van het voorwerp zoodanige lichtbundels uitgaan, verkrijgt men op den wand eene menigte gedeeltelijk op elkander liggende beelden van den vorm der opening, die alle te zamen een beeld moeten vormen, dat in gedaante overeenkomt met het lichtgevend voorwerp zelf; fig. 354 zal dit nog dui-

Fig. 354.

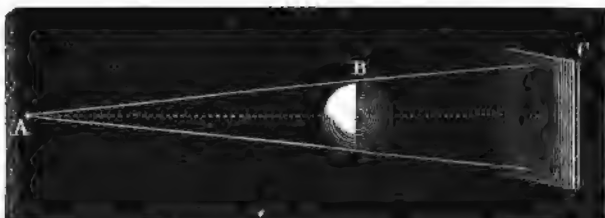


delijker maken. Het is aan deze eigenschap toe te schrijven, dat de beelden, die men waarneemt, als de zon door eene naauwe opening schijnt, steeds rond of langwerpig rond zijn, naar gelang het vlak, waarop het beeld gevormd wordt, al of niet loodregt staat op de rigting der stralen. Bevindt men zich bijv. onder een niet al te digt van bladeren voorzienen boom, waarop de zon schijnt, dan ziet men op den grond tusschen de schaduw van de bladeren verlichte plekken, die allen den vorm van meer of min langwerpige ellipsen hebben, naar gelang de zon lager of hooger staat; aan geen dier lichte plaatsen kan men de uit den aard der zaak in vorm zoo zeer verschillende openingen tusschen de bladeren erkennen. Bij eene zon-eklips, waarbij de zon zich niet meer cirkelvormig vertoont, maar dezelfde sikkelvormige gedaante heeft als de maan bij het eerste of laat-

ste kwartier ziet men dat de lichte plekken tusschen de schaduw der bladeren alle dezelfde gedaante als de zon op dat oogenblik hebben, alleen met dat onderscheid, dat de bolle zijde naar den tegenovergestelden kant is gekeerd.

374. Schaduw, halfschaduw. — Wanneer van een lichtgevend punt

Fig. 355.



A (Fig. 355) lichtstralen vallen op een ondoorschijnend ligchaam B, dan worden zij daardoor onderschept, zoodat de ruimte tusschen E en F op een daarachter geplaatst scherm C niet verlicht wordt. Dit gebrek aan licht noemt men schaduw. Is het licht sterk en de afstand van het scherm C niet groot, zoodat geen zijdelingsch licht op het in de schaduw gelegene gedeelte van het scherm kan vallen, dan is de afscheiding van licht en donker scherp aangewezen. Dit zal echter niet het geval zijn, wanneer het licht niet van een enkel punt maar van een lichtgevend ligchaam uitgaat, zoo als in fig. 356 is voorgesteld.

Fig 356.



Wanneer AB het lichtgevend ligchaam is, en CD een ondoorschijnend, dan zullen van alle punten van AB lichtstralen uitgaan; men zal inzien, dat op het gedeelte GH van het scherm volstrekt geen licht kan komen, en dat dit zich dus geheel in de schaduw moet bevinden, doch dat de tusschen de cirkels EF en GH gelegene ring gedeeltelijk verlicht moet worden, daar een in dien ring gelegen punt licht ontvangt van een gedeelte van de oppervlakte van AB Aan dit gedeelte, dat noch geheel verlicht is, noch zich geheel in de schaduw bevindt, geeft men den naam van *halfschaduw*.

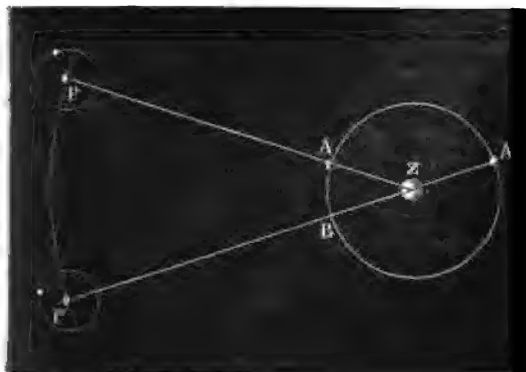
De afscheiding tusschen de schaduwen en de verlichte gedeelten der voorwerpen is nimmer zoo scherp als men volgens het voorgaande zoude onderstellen. Vooreerst komt het licht nimmer van een enkel punt, en neemt men dus overal eene halfschaduw waar; maar bovendien wordt door alle omringende voorwerpen licht uitgestraald, dat zoowel op den schaduwkant als op den verlichten kant valt, en dus oorzaak is, dat licht en donker zachter in elkander vloeijen. Ook de kleur der voorwerpen oefent op den aard van het licht eenen invloed uit; daaromtrent kunnen wij echter in geene bijzonderheden treden, alvorens meer in het bijzonder over den oorsprong der kleuren gehandeld te hebben.

375. Snelheid van het licht. — Hoewel de voortplanting van het licht schijnbaar oogenblikkelijk plaats heeft, hebben reeds in oude tijden verscheidene wijsgeeren en natuurkundigen beweerd, dat die voortplanting in een bepaalden en meetbaren tijd moet geschieden. Proeven door Galilei in het werk gesteld om die snelheid te vinden, leidden tot geene bepaalde uitkomsten. De eerste, die allen twijfel dienaangaande heeft weggenomen en de snelheid van het licht heeft bepaald, was de Deensche sterrekundige Römer (1675). Hij ging daarbij op de volgende wijze te werk.

De planeet Jupiter is vergezeld van vier manen of satellieten, die zich allen rondom de hoofdplaneet bewegen; dit heeft ten gevolge, dat die manen zich dus eens achter de planeet bevinden en dus door haar verduisterd worden, dan weder voor langs de planeet heengaan. Römer bevond, dat de verduisteringen der manen door de planeet zelve, die door Cassini met groote naauwkeurigheid vooraf berekend waren, steeds iets te vroeg invielen, wanneer de afstand van de aarde tot de planeet de kleinst mogelijke was, doch daarentegen altijd een weinig te laat werden waargenomen, wanneer de aarde zoo ver mogelijk van Jupiter verwijderd was. Hij leidde daaruit af, dat dit alleen door de snelheid van het licht kon veroorzaakt worden, en zag zich weldra in staat die snelheid zelve daaruit te berekenen. De onderlinge zamenhang dezer verschijnselen laat zich gemakkelijk verklaren. Zij Z (Fig. 357) de zon, A de aarde en AA′ hare loopbaan, P de planeet Jupiter en PP′ een gedeelte van hare loopbaan, terwijl de om P en P′ getrokken cirkeltjes den weg voorstellen, dien een harer manen om haar beschrijft. De maan, die zich het digtst bij Jupiter bevindt, volbrengt hare omwenteling om de planeet in 42ᵘ 28ᵐ 36ˢ; dit getal is het gemiddelde van talrijke waarnemingen. De tijd, die verloopen moet tusschen twee achtervolgende verduisteringen van die maan moet dus evenveel bedragen. Neemt men nu het oogenblik, waarop de maan in de scha-

duw van de planeet verdwijnt, naauwkeurig waar, wanneer de aarde zich in A en de planeet zich in P bevindt, dus zoo digt mogelijk bij elkander, en herhaalt men de waarneming eenigen tijd later, wanneer de beide hemelligchamen zich in A′ en P′ bevinden, dus op den grootst mogelijken afstand van elkander, dan zou men meenen, dat de tusschen die beide waarnemingen verloopen tijd juist een geheel aantal malen de bovengemelde 42^u 28^m 36^s moet bedragen; dit blijkt echter niet het geval te zijn, daar er bij deeling door dit getal eene rest van 16^m 26^s overblijft. Dit verschil kan alleen daaraan worden toegeschreven, dat het licht in het eerste geval slechts den weg PA, in het laatste daarentegen den weg P′A′ heeft moeten afleggen. Men leidt dus daaruit af, dat de overblijvende 16^m 26^s besteed zijn om den weg BA′, dat is de middellijn van de loopbaan der aarde af te leggen, en dat dus de afstand van de zon tot de aarde door het licht gemiddeld in 8^m 13^s wordt afgelegd. Daar die afstand ongeveer 153000000 kilometers of Ned. mijlen bedraagt, zoo moet de snelheid van het licht ongeveer 310000 Ned. mijlen in de seconde bedragen; het licht doorloopt dus in eene seconde eene ruimte nagenoeg achtmaal grooter dan de omtrek der aarde.

Fig. 357.



In het jaar 1849 hebben Fizeau en Foucault proeven genomen aangaande de snelheid van het licht aan de oppervlakte der aarde; deze proeven en de theorie, waarop zij berusten, kunnen bezwaarlijk begrepen worden, dan nadat de leer van de terugkaatsing van het licht behandeld en eenige optische werktuigen beschreven zijn; wij laten die verklaring daarom hier achterwege, en bepalen ons tot de vermelding, dat de uitkomsten dezer waarnemingen dezer natuurkundigen zeer goed overeenkomen met de door Römer gevondene snelheid, daar zij bevonden, dat de snelheid van het licht 315000 kilometers in de seconde bedraagt.

Eene nadere bevestiging van de bovengemelde snelheid van het licht vindt

men nog in hetgeen de sterrekundigen de aberratie van het licht noemen. Dit verschijnsel werd door Bradley in 1725 ontdekt; daar het echter geheel van sterrekundigen aard is, meenen wij het hier niet verder te behoeven te ontwikkelen, en hen, die het verlangen te kennen, naar leerboeken over sterrekunde te mogen verwijzen.

376. **Lichtsterkte; photometers.** — De wet voor de verandering der sterkte van het licht naar gelang van den afstand is dezelfde als die, welke wij hiervóór voor het geluid (125) en voor de warmte (169) hebben opgegeven; de lichtsterkte verandert namelijk in de omgekeerde reden van de tweede magten der afstanden. Deze wet laat zich ook weder daardoor verklaren, dat de sterkte van het licht moet afnemen in gelijke mate als de oppervlakken van concentrische bollen, wier middenpunt het lichtend punt is en wier straal de afstand tot het lichtend punt aanduidt, daar eene zelfde hoeveelheid licht zich dan als 't ware over eene grootere oppervlakte moet verspreiden; en daar die oppervlakken zich onderling verhouden als de tweede magten hunner stralen, moet dus de lichtsterkte in dezelfde reden afnemen. Men kan er zich proefondervindelijk van overtuigen, door op zekeren afstand van een voorwerp ééne kaars te plaatsen, op een tweemaal grooteren afstand 4 kaarsen, op een driemaal grooteren afstand 9 kaarsen, enz.; men zal dan bij onderlinge vergelijking bevinden, dat het voorwerp in alle drie gevallen evenveel verlicht wordt.

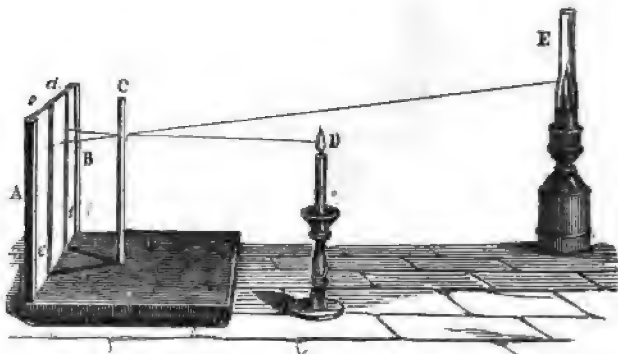
De bepaling of meting der lichtsterkte geschiedt met daartoe vervaardigde toestellen, *lichtmeters* of *photometers* genoemd. Men heeft er verscheidene uitgedacht, maar geen is geschikt om met groote naauwkeurigheid de lichtsterkte van eene lichtbron of van een verlicht voorwerp te meten; alleen kan men door onderlinge vergelijking die sterkte eenigzins bepalen.

Een der eenvoudigste en tevens doelmatigste lichtmeters is die van Bunsen. Deze bestaat uit een papieren scherm, waarop men met stearine een of ander figuur, bijv. een kring, gemaakt heeft. Plaatst men achter en voor het scherm lichtbronnen, dan zal men bevinden, dat het met stearine doortrokken gedeelte van het papier zich donker op een lichten grond voordoet, als het voorste licht sterker is, doch licht op een donkeren grond, als het achterste licht het in sterkte wint. Geven beide bronnen evenveel licht aan de twee oppervlakten van het papieren scherm, dan is de stearinevlek onzigtbaar. Om dus de sterkte van twee lichtbronnen onderling te vergelijken, plaatst men eene daarvan aan elken kant van het scherm, op zoodanigen afstand, dat men

de vlek niet meer merkt; daarna meet men de afstanden van de beide lichtbronnen tot het scherm; hare lichtsterkten zullen dan tot elkander in reden zijn als de vierkanten dier afstanden.

De lichtmeter van Rumford bestaat uit een scherm van mat glas of van geolied papier AB (Fig. 358), waarvoor op een geringen afstand een vertikaal staafje C geplaatst is. Plaatst men nu op eenigen afstand twee licht-

Fig. 358.

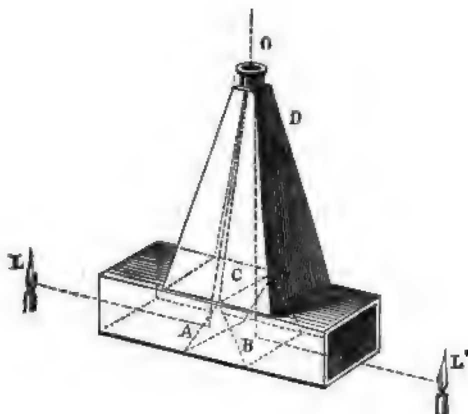


bronnen D en E, dan zal elke eene schaduw van het stokje op het scherm veroorzaken. Hoe sterker het licht is, des te donkerder en zwarter zal ook de schaduw zijn. Verplaatst men dus de beide lichtbronnen zoo lang, totdat de beide schaduwen *dd* en *ee* even donker zijn, dan zal men, even als bij den lichtmeter van Bunsen, uit de afstanden de lichtsterkten kunnen berekenen.

De lichtmeter van Ritchie berust op de eigenschap, dat twee lichtgevende ligchamen twee gladde witte oppervlakken, die men op gelijken afstand beschouwt, evenveel verlichten, wanneer die oppervlakken ons even helder toeschijnen. Hij is zamengesteld uit een kastje, waarin zich twee spiegels A en B (Fig. 359) bevinden, die elk een hoek van 45° maken met een in den wand geplaatst mat glas C; de beide lichtbronnen worden zoodanig geplaatst, dat de lichtstralen op de spiegels vallen, door welke zij tegen het mat glas worden teruggekaatst. Men plaatst dan de lichtbronnen zoodanig, dat de beide helften van het mat glas, dat men bij voorkeur door een koker D beschouwt, even helder schijnen, en berekent dan uit de afstanden van die lichtbronnen hare betrekkelijke sterkte.

Bij de zoo even vermelde wet is ondersteld, dat de lichtstralen van de beide lichtbronnen, die men vergelijkt, onder gelijke hoeken invallen op de verlichte oppervlakte. Is dit niet het geval, dan moet men ook van dien hoek rekenschap houden, daar de sterkte van het schuins opgevangen licht, blijkens in het werk gestelde proeven en ook volgens theoretische beschouwingen, evenredig is aan den cosinus van den hoek, dien de lichtstralen maken met eene lijn, welke loodregt op dat verlichte oppervlak staat.

Fig. 359.



B. TERUGKAATSING VAN HET LICHT.

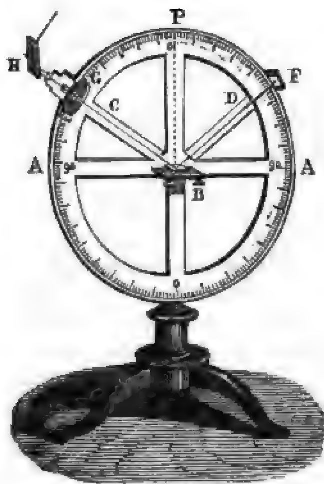
377. Terugkaatsing van het licht door een plat oppervlak; heliostaat. — Bij de beschrijving van den lichtmeter van Ritchie hebben wij reeds gewag gemaakt van de eigenschap van gladde oppervlakten om de lichtstralen terug te kaatsen; wij moeten thans de wetten leeren kennen, volgens welke die terugkaatsing plaats heeft.

Terugkaatsing van licht wordt nagenoeg bij alle voorwerpen waargenomen, maar niet bij allen op dezelfde wijze. Valt een lichtstraal door eene opening in den wand van een duister vertrek op een spiegel, dat is op eene gepolijste glazen of metalen oppervlakte, dan kan men aan de in de kamer zwevende stofdeeltjes de rigting waarnemen zoowel van den invallenden als van den teruggekaatsten lichtstraal. Was de terugkaatsing volkomen, dan zouden wij niets van het spiegelend oppervlak waarnemen; maar aan die oppervlakte heeft tevens een meerdere of mindere verstrooijing van het licht, dat is eene terugkaatsing naar alle kanten, plaats, zoodat ook eenige dier onregelmatig teruggekaatste lichtstralen tot ons oog komen, en aldus ons het ligchaam doen be-

merken, waardoor het licht wordt teruggekaatst. De sterkte van het verstrooide licht is des te aanzienlijker, naarmate de spiegel minder gepolijst is; bij een goeden spiegel daarentegen bemerken wij ter naauwernood het spiegelend oppervlak tusschen ons oog en het teruggekaatste beeld.

Bij de terugkaatsing van het licht hebben dezelfde wetten plaats, die wij hiervóór hebben opgegeven voor de terugkaatsing van veêrkrachtige ligchamen (39), van het geluid (124) en van de warmte (161), dat is: 1°. de invallende en de teruggekaatste stralen liggen beide in een zelfde vlak, dat loodregt staat op het terugkaatsend oppervlak; 2°. de hoek van invalling en de hoek van terugkaatsing zijn onderling gelijk. Bij de zoo even vermelde proef in eene donkere kamer met een spiegel, waarop men een lichtstraal laat vallen, kan men deze beide wetten gemakkelijk waarnemen. Kan men de stralen zelven minder goed volgen, dan heeft men zich slechts regte lijnen voor te stellen, van de opening in den wand en van het door terugkaatsing verkregen beeld getrokken naar de plaats op den spiegel, waar de lichtstraal wordt teruggekaatst, en dan de hoeken te meten. Wil men de wetten naauwkeuriger aantoonen, dan bedient men zich van een verdeelden cirkel, aan wiens middenpunt een spiegeltje B bevestigd is, zoo als in fig. 360 is voorgesteld; C en D zijn twee om het middenpunt beweegbare linialen. Het liniaal C is voorzien van een plaatje G, waarin eene kleine opening is gemaakt, alsmede van een spiegeltje, waarmede men een lichtstraal juist zoo op G kan laten vallen, dat hij in het middenpunt B komt; het liniaal D plaatst men zoodanig, dat het beeld door het plaatje F, waarin zich een mat glas bevindt, wordt opgevangen; men zal dan bevinden dan de hoek van invalling GBP en de hoek van terugkaatsing PBF onderling gelijk zijn.

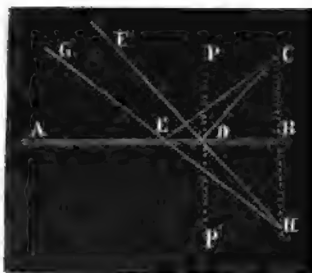
Fig. 360.



Uit deze wetten kan men het volgende afleiden aangaande de beelden, welke door terugkaatsing op vlakke spiegels ontstaan. Zij C (Fig. 361) een lichtgevend punt, van waar een straal CD uitgaat, die door AB wordt teruggekaatst in de rigting DF, in dier voege, dat de hoeken CDP en FDP onderling gelijk zijn. Bevindt zich het oog in de lijn FD, dan

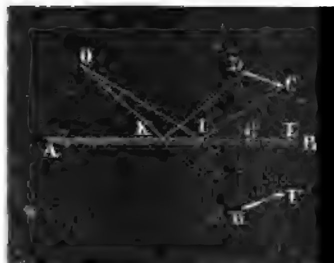
zal het schijnen, alsof ook het lichtend punt C zich in de lijn FD bevindt en wel op eenen afstand achter D, even groot als de afstand CD; is dus DH = DC, dan vertoont het ligchaam zich in H. Daar nu hoek CDB = FDA = BDH is, zoo moeten, daar bovendien CD = DH en DB = DB is, de driehoeken CDB en HDB gelijk en gelijkvormig zijn; CB is dus even groot als HB, en CH staat loodregt op AB. Daaruit volgt, dat men het beeld van een voor den spiegel geplaatst punt daarachter waarneemt op eenen afstand even groot als die, waarop het daarvóór gelegen is, en wel in de loodlijn uit dat punt op het terugkaatsend oppervlak getrokken.

Fig. 361.



Past men dit toe op een voorwerp zooals CD in fig. 362, dan zal men, door voor elk punt zoodanige constructie te verrigten, gemakkelijk het geheele beeld kunnen construeren. Door EF = EC en GH = GD te nemen, en de punten F en H door eene dergelijke figuur te vereenigen als CD, zal men het beeld verkrijgen; vereenigt men deze punten met het punt O, waar men het oog onderstelt, en trekt men CI en DK, dan kan men gemakkelijk aantoonen, dat de hoeken aan I, als ook die aan K, gelijk zijn, en dat dus de zoo even vermelde wet hier is in acht genomen. De figuur doet ons tevens zien, dat voor het oog het beeld juist tegenovergesteld is aan het voorwerp zelf, of zooals men het doorgaans noemt, daarmede symmetrisch is.

Fig. 362.

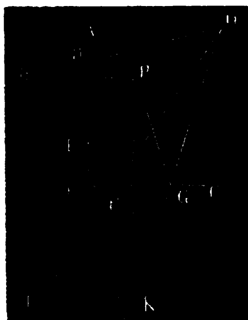


Eene toepassing van de vlakke spiegels treft men aan bij den *heliostaat*, dat is een toestel, waarbij een spiegel door een uurwerk zoodanig in beweging wordt gehouden, dat hij de zon in haren schijnbaren loop geheel volgt, zoodat de daardoor teruggekaatste lichtstralen steeds dezelfde rigting behouden. Voor naauwkeurige en langdurige lichtproeven is de heliostaat dus van groot belang.

378. **Terugkaatsing door twee spiegels, die eenen hoek met elkander maken; kaleidoskoop.** — In fig. 363 zijn AB en BC twee spiegels, die eenen regten hoek met elkander maken, en P een daar tusschen geplaatst voorwerp. Bevindt zich het oog nu in O, dan zullen er

op verschillende wijzen beelden van dat punt gevormd worden; door enkele terugkaatsing komen lichtstralen van P naar O, langs de wegen PDO en PGO; maar ook door dubbele terugkaatsing langs PEFO zal men het voorwerp bemerken. Er zullen dus in dit geval drie beelden H, I en K gevormd worden. Herhaalt men de waarneming, wanneer de hoek tusschen de spiegel 60° bedraagt, dan neemt men 5 beelden waar; is de hoek 45°, dan bedraagt hun getal 7; hoe kleiner de hoek is, des te grooter is het getal der beelden.

Fig. 363.



Op de terugkaatsing op spiegels, die onderling eenen hoek maken, berust de zamenstelling van den *kaleidoskoop*. In zijn eenvoudigsten vorm bestaat dit werktuig uit een bordpapieren koker, aan het eene einde gesloten met een mat glas, aan het andere met een bordpapieren plaatje, waarin eene kleine opening is gemaakt. Binnen in den koker bevinden zich twee spiegels die eenen hoek van 45° of van 60° met elkander maken; in het laatste geval plaatst men er veelal drie spiegels in. Aan het einde der buis tusschen het mat geslepen glas en een daarmede evenwijdig doorschijnend glaasje plaatst men eenige kleine gekleurde voorwerpjes. Door de werking der spiegels ziet men dan die voorwerpen meermalen teruggekaatst; deze verschillende beelden vormen te zamen eene fraaije figuur, die telkens verandert, wanneer de onderlinge ligging der voorwerpen veranderd wordt, door slechts even aan den koker te schudden.

379. **Evenwijdige spiegels.** — Uit hetgeen zoo even gezegd is aangaande het aantal beelden, gevormd door spiegels, die eenen hoek met elkander maken, volgt, dat als die hoek 0° wordt, dat is, wanneer de spiegels evenwijdig loopen, het getal dier beelden oneindig groot moet zijn. Dit laat zich ook gemakkelijk aantoonen door fig. 364. Zijn AB en CD aldaar de twee evenwijdige spiegels, en O een lichtgevend punt, dan zal er een eerste beeld gevormd worden in P, even ver achter AB gelegen, als O er vóór is geplaatst. De op AB teruggekaatste lichtstralen vallen op CD, en vormen een nieuw beeld Q, zoodanig, dat DQ = DP; eveneens verkrijgt men nog andere beelden R en S, wanneer het licht driemaal of viermaal wordt teruggekaatst. Neemt men aan, dat het licht het eerst op CD wordt teruggekaatst, dan zal men eene reeks van beelden P′, Q′, R′, S′ verkrijgen. Het laat zich inzien, dat het aantal beelden, dat men op deze wijze verkrijgt oneindig groot moet zijn; daar

echter bij elke terugkaatsing het licht een gedeelte zijner sterkte verliest, zijn de laatste en schijnbaar meest verwijderde beelden ook de minst heldere; na eenige terugkaatsingen kunnen zij dientengevolge niet meer waargenomen worden.

Fig. 364.



Op eene zeer eenvoudige wijze kan men dit verschijnsel aanschouwelijk maken door een van binnen gepolijsten cilindervormigen koker, in wiens bodem men eene opening heeft gemaakt, en dien men tegen het licht houdt, door den anderen kant daarin ziende. Daar de twee tegenoverstaande kanten steeds evenwijdig zijn, geschiedt hier de terugkaatsing even als bij evenwijdige spiegels; men ziet dan een groot aantal concentrische ringen, die in helderheid afnemen, naarmate zij zich meer van het middenpunt verwijderen.

Iets dergelijks als bij de terugkaatsing op evenwijdige spiegels neemt men waar bij elken glazen spiegel. Bij zoodanigen spiegel toch worden zoo wel op de buitenste oppervlakte, als op die, waartegen het verfoeliesel is aangebragt lichtstralen teruggekaatst. Men ziet dan ook verschillende beelden, vooral wanneer men zich in de schuinte een beeld aanschouwt. Plaatst men bijv. digt voor eenen glazen spiegel de vlam eener kaars, en houdt men het oog op eenigen afstand eveneens digt bij den spiegel, dan ziet men verscheidene beelden; het eerste is slechts zwak, het tweede zeer duidelijk, de volgende zwakker en in sterkte afnemende. Het is om deze vermenigvuldiging van beelden te vermijden, dat men zich bij natuurkundige proeven doorgaans bedient van metalen spiegels, hoewel de daardoor teruggekaatste beelden wegens de absorptie van een grooter getal lichtstralen veel minder helder zijn.

380. **Terugkaatsing door gebogene oppervlakken.** — Bij de terugkaatsing op gebogene oppervlakken gelden volkomen dezelfde wetten, die wij hiervoor hebben opgegeven voor die op platte vlakken, mits men in plaats van het gebogen oppervlak het rakend vlak neemt in het punt, waar de lichtstraal daarop invalt. Het spreekt van zelf, dat de gedaante van het gebogen oppervlak een aanzienlijken invloed moet uitoefenen op de rigting der teruggekaatste lichtstralen in verschillende punten van dat opper-

vlak, en dus ook op de gedaante van het gevormde beeld. Wij zullen achtervolgens de voornaamste gevallen beschouwen.

381. **Spherische spiegels.** — Daar het rakend oppervlak aan een bol overal loodregt staat op den straal, is het gemakkelijk steeds de rigting der teruggekaatste lichtstralen aan te wijzen. Bevindt zich in het middenpunt van een hollen bol een lichtgevend punt, en is de binnenste oppervlakte gepolijst, dan moeten alle teruggekaatste lichtstralen weder in het middenpunt, van waar zij uitgingen, te zamen komen. In de praktijk kunnen echter zoodanige spiegels niet te pas komen, en men maakt alleen gebruik van gedeelten van bolvormige oppervlakten. Is de bolle zijde gepolijst en worden de lichtstralen daartegen teruggekaatst, dan heet hij een *bolle of convexe spherische spiegel;* heeft daarentegen de terugkaatsing plaats tegen de binnenste gepolijste oppervlakte, dan wordt zulk een spiegel een *holle* of *concave spherische spiegel* genoemd. In beide gevallen noemt men *hoofdas* de lijn, die van het midden van den spiegel getrokken is naar het middenpunt van het bolvormig oppervlak. De lijn, welke door dat middenpunt naar eenig ander punt van den spiegel getrokken wordt, heet *neven-as.* Eindelijk verstaat men door *opening* van den spiegel het aantal graden van den boog, volgens welken de spiegel gesneden wordt door een vlak gaande door het middenpunt van den bol.

382. **Terugkaatsing door holle spherische spiegels; brandpunten.** — Beschouwen wij eerst het geval, dat de lichtstralen allen evenwijdig loopen, zooals in fig. 365 is voorgesteld. De lichtstralen CD, EG, HI, enz. worden teruggekaatst volgens lijnen DF, GF, IF, enz., in dier voege, dat de teruggekaatste lichtstraal met den straal des cirkels, wiens middenpunt in O gelegen is, een even grooten hoek maakt, als de invallende lichtstraal. De teruggekaatste stralen loopen in de afbeelding alle zamen naar het punt F; dit is niet volkomen juist, maar wanneer de opening van den cirkel slechts weinige graden bedraagt, dan zal het verschil zoo gering zijn, dat men mag aannemen, dat zulks wel het geval is. Uit de figuur kan men zulks gemakkelijk aantoonen. De driehoeken OFD, OFG, enz. zijn allen gelijkbeenig, daar de hoeken aan O als verwis-

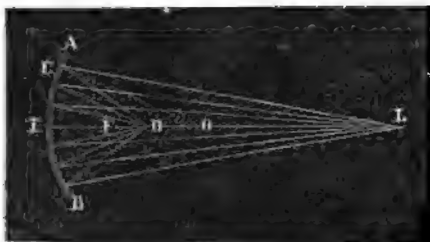
Fig. 365.



selende binnenhoeken gelijk zijn aan de hoeken van invalling; de zijden OF en DF, OF en GF enz. moeten dus ook twee aan twee gelijk zijn. Daar nu de hoeken aan de basis van deze gelijkbeenige driehoeken slechts zeer klein zijn, indien namelijk het getal graden van den cirkelboog AB gering is en niet meer dan 6° tot 8° bedraagt, zoo zal de som der beide gelijke zijden slechts zeer weinig van de basis verschillen, zoodat men zonder merkbare fout mag stellen, dat DF = FO = $\frac{1}{2}$ DO, GF = FO = $\frac{1}{2}$ GO, enz.; daar DO, GO, enz. allen stralen zijn van den bol, zoo zal de afstand van het punt F tot O slechts weinig verschillen van de helft van den straal. Dit punt, waar de evenwijdig invallende stralen door eenen spherischen spiegel worden teruggekaatst, heet het *brandpunt* of ook wel het *hoofdbrandpunt.* De afstand van het brandpunt tot den spiegel, welke doorgaans de *brandpunts-afstand* genoemd wordt, is dus gelijk aan de helft van den straal. De onnaauwkeurigheid, daardoor veroorzaakt dat niet alle teruggekaatste stralen juist in het brandpunt te zamen komen, noemt men de *spherische aberratie* of afwijking wegens bolvormigheid.

Bevindt het lichtgevend punt zich ergens in L (Fig. 366), dan zal een lichtstraal LC volgens CD worden teruggekaatst, wanneer namelijk deze lijnen zoodanig getrokken zijn, dat de hoeken LCO en OCD gelijk zijn. Daar de hoek OCD dan kleiner is dan COD, zoo zal ook het punt D digter bij O dan bij E gelegen zijn, en zich dus tusschen het middenpunt O en het brandpunt F bevinden. Het punt D, waar de van L uitgaande lichtstralen worden teruggekaatst, heet het *koppelbrandpunt* ten opzigte van L. Dezen naam geeft men er aan omdat, wanneer het lichtgevend punt zich in D bevond, de teruggekaatste lichtstralen elkander omgekeerd in L zouden ontmoeten. Hoe digter L bij O komt, des te meer zal ook D daartoe naderen. Valt L in O, dan valt ook D in O, hetgeen overeenkomt met het hiervóór reeds opgemerkte, dat de lichtstralen, van het middenpunt van een bolvormigen spiegel uitgaande, allen in dat middenpunt terugkeeren.

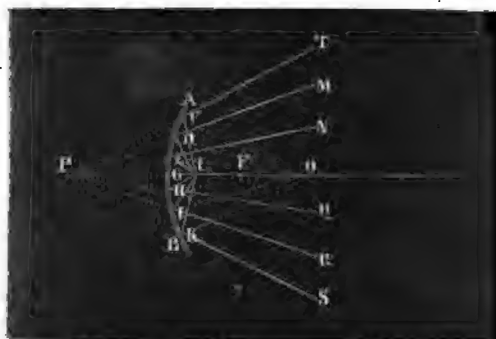
Fig. 366.



Is het lichtgevend punt ergens tusschen F en O geplaatst, dan zal, blijkens het voorgaande, het koppelbrandpunt ergens in de hoofdas aan de andere zijde van O gelegen zijn. Is het lichtgevend punt in F zelf gelegen, dan loopen de teruggekaatste lichtstralen allen onderling evenwijdig. Bevindt het lichtgevend

punt zich daarentegen tusschen den spiegel en zijn brandpunt, dan zullen de teruggekaatste lichtstralen moeten divergeren, zooals in fig. 367 is voorgesteld. Er ontstaat dus in dit geval geen brandpunt. Verlengt men echter de teruggekaatste lichtstralen CT, DM, EN, enz. aan gene zijde van den spiegel, dan zullen zij elkander in een punt P ontmoeten; dit is dus een punt, van hetwelk men zou kunnen onderstellen, dat die lichtstralen uitgaan. Men noemt dit het *virtuele brandpunt.*

Fig. 367.



Bevindt zich het lichtgevend punt niet op de hoofdas, maar op de neven-as, dan geschiedt de terugkaatsing nogtans volkomen volgens dezelfde regels; het brandpunt is in dat geval in dezelfde as gelegen, waarin zich ook het lichtgevend punt bevindt. Dat punt en het koppelbrandpunt bevinden zich steeds aan verschillende zijden van de hoofdas.

383. **Beelden, door holle spherische spiegels gevormd.** — Plaatst men tusschen het middenpunt en het brandpunt van eenen hollen spherischen spiegel een of ander voorwerp, dan vormt zich van dat voorwerp een beeld aan de andere zijde van het middenpunt, zoo als duidelijk is uit fig. 368. De van het uiteinde C van dat voorwerp uitgaande lichtstralen vereenigen zich in N; die welke van D uitgaan, komen zamen in M. Er ontstaat dus een beeld MN, dat het omgekeerde van het voorwerp CD is, en tevens dat voorwerp in grootte overtreft. Was MN het voorwerp, dan zouden de daarvan uitgaande lichtstralen in CD te zamen komen; bevindt zich dus het voorwerp verder dan het middenpunt van den spiegel verwijderd, dan moet zich aan de andere zijde van dat middenpunt een kleiner, doch omgekeerd beeld vormen. Men kan de eerste dezer eigenschappen zeer gemakkelijk duidelijk maken, door op de plaats, waar zich het beeld vormen moet, een scherm van papier of van mat glas te plaatsen, waarop alsdan het beeld zigtbaar zal zijn. In dit

Fig. 368.

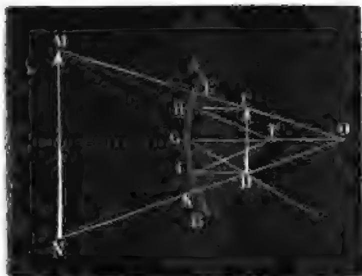


opzigt zijn de door spherische spiegels gevormde beelden onderscheiden van de door vlakke spiegels teruggekaatste, welke men niet op een scherm kan opvangen. De reden van dat verschil is eenvoudig daarin gelegen, dat alle van één punt uitgaande en door den hollen spherischen spiegel teruggekaatste stralen weder in één punt zamenkomen, terwijl de door een vlakken spiegel teruggekaatste stralen naar alle kanten divergeren.

Hoe verder het voorwerp van den spiegel verwijderd is, des te meer nadert het beeld tot het brandpunt. Op zeer grooten afstand, zoo als bij de zon het geval is, wordt het beeld in het brandpunt zelf gevormd. De grootte van het beeld kan men uit de bekende afstanden berekenen, of ook wel afleiden uit den hoek, waaronder men het voorwerp zelf zoude zien, als men in het punt G (Fig. 368) geplaatst was. De zon bijv. vertoont zich aan ons onder een hoek van ongeveer een halven graad; het beeldje in het brandpunt zal dan zoo groot zijn, dat het, uit G gezien, zich eveneens onder een hoek van een halven graad vertoont. De grootte van het beeld hangt dus af van den straal van den bol; is die eene ned. el, dan is de middellijn van het zonnebeeld nagenoeg 3 strepen. Deze proef geeft ons tevens een eenvoudig middel om den straal van het oppervlak van een spiegel te bepalen; de plaats toch van het brandpunt kan men gemakkelijk proefondervindelijk bepalen, en de straal moet dan juist het dubbel van den brandpuntsafstand bedragen.

Bevindt zich het voorwerp tusschen den spiegel en het brandpunt, dan ontstaat er geen beeld, daar de teruggekaatste stralen van een zelfde punt alsdan divergeren. Verlengt men ze echter achter den spiegel, dan ontmoeten zij elkander aldaar, zooals in fig. 369 is voorgesteld. De teruggekaatste lichtstralen EO, HF, GD loopen allen uiteen, doch aan de andere zijde verlengd, ontmoeten zij elkander in M. Het beeld MN is dus achter den spiegel gelegen; het is dus geen eigenlijk beeld, en draagt daarom den naam van *virtueel* beeld.

Fig. 369.



De verschillende beelden, die in eenen hollen spherischen spiegel gevormd worden, kan men gemakkelijk waarnemen, door zich achtervolgens op verschillende afstanden voor eenen zoodanigen spiegel te plaatsen. Op eenen afstand, grooter dan de straal, ziet men zijn eigen beeld omgekeerd doch kleiner. Plaatst men zich digter bij, dan wordt het beeld verward; in het brandpunt ziet men er

in 't geheel geen. Komt men nog nader, dan ziet men een vergroot, doch regtopstaand beeld; dit laatste is het virtuele beeld.

De voorgaande eigenschappen kunnen allen gemakkelijk worden afgeleid uit eene formule, welke de onderlinge betrekking aanduidt tusschen den straal van den bol en de afstanden van den spiegel tot het voorwerp en tot het beeld. Zij AB (Fig. 370) de spiegel, waarvan het getal graden slechts gering is en hoogstens 6° tot 8° bedraagt. Is P het lichtgevend punt en P' het koppelbrandpunt, dan zijn de hoeken PAO en P'AO gelijk, zoodat PO : P'O = AP : AP'. Stelt men nu OC = r, CP = p en CP' = p', dan is PO = $p - r$, P'O = $r - p'$; is de opening van den spiegel zeer gering, dan zal AP' slechts weinig van CP', en AP weinig van CP verschillen; de bovenstaande evenredigheid wordt dan $p - r : r - p' = p : p'$, waaruit na herleiding volgt:

Fig. 370.



$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{r}$$

Wil men den afstand p' uitdrukken door middel van p en r, dan vindt men

$$p' = \frac{pr}{2p - r}$$

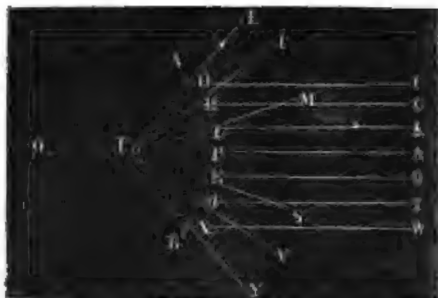
welke formule den afstand aanduidt van het beeld tot den spiegel.

Loopen de stralen evenwijdig, dan is $p = \infty$ en dus $\frac{r}{p} = 0$; de waarde van p' is dan $\frac{1}{2}r$, hetgeen overeenkomt met de bovengemelde eigenschap, dat het hoofdbrandpunt gelegen is in het midden van den straal. Is $p > r$, dan moet volgens die formule $p' < r$ zijn; voor $p = r$ is ook $p' = r$, doch is $p < r$, dan wordt $p' > r$, hetgeen alles eveneens met de waarneming overeenkomt. Wordt $p = \frac{1}{2}r$, dan is $p' = \infty$; voor $p < \frac{1}{2}r$ is p' negatief, hetgeen aanduidt, dat in dit geval het beeld eigenlijk aan gene zijde van den spiegel gelegen is.

384. **Terugkaatsing door bolle spherische spiegels.** — De bolle spiegels hebben geene werkelijke brandpunten, daar de door hen teruggekaatste stralen altijd divergeren. Vallen zij evenwijdig in, zoo als in fig. 371, dan worden zij teruggekaatst volgens de rigtingen DE, HI, LM, enz. Verlengt

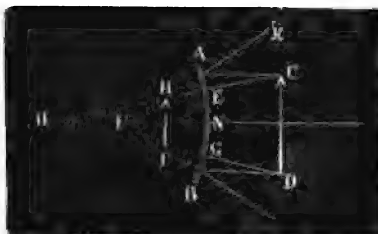
men echter die lijnen aan den achterkant van den spiegel, dan ontmoeten zij, zoo de opening gering is, elkander in een punt F, waarvan men gemakkelijk kan bewijzen, dat het, even als het hoofdbrandpunt bij eenen hollen spiegel, op de helft van den straal OP moet gelegen zijn. Dit punt F is het virtuele hoofdbrandpunt van den bollen spiegel.

Fig. 371.



Het beeld, dat men door een bollen spiegel van een daarvoor geplaatst voorwerp CD (Fig. 372) verkrijgt, kan men gemakkelijk construeren. Van C gaan verschillende lichtstralen uit; de straal CA wordt volgens AK teruggekaatst, de straal CE volgens hare eigene rigting; verlengt men de lijnen KA en CE tot achter den spiegel, dan ontmoeten zij elkander in H, waar dus het virtuele beeld van C gevormd wordt. Op gelijke wijze kan men de andere punten van het beeld bepalen; het blijkt dan, dat men door een bollen spiegel een verkleind, doch regtopstaand beeld van een daarvoor geplaatst ligchaam verkrijgt.

Fig. 372.



De hiervóór gegevene formule voor de holle spiegels behoeft voor de bolle slechts eene geringe verandering te ondergaan. Daar het beeld altijd virtueel is, moet p' steeds hetzelfde teeken hebben als r, doch p het tegenovergestelde. Men behoeft dus slechts in die formulen p negatief te nemen, waardoor zij veranderen in

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{2}{r}, \quad p' = \frac{pr}{2p + r}.$$

De laatste formule doet ons zien, dat er altijd een beeld achter den spiegel gevormd wordt, daar p' noch negatief, noch nul worden kan.

Wat de grootte der beelden aangaat, zoowel bij de holle als bij de bolle spiegels, zoo blijkt uit de voorgaande afbeeldingen terstond, dat die door eene evenredigheid kan worden berekend, wanneer men slechts de afstanden van

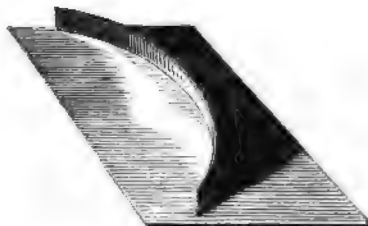
het voorwerp en van zijn beeld tot den spiegel kent, alsmede de afmetingen van het voorwerp.

385. **Parabolische en andere gebogene spiegels.** — Van de parabolische spiegels hebben wij reeds gewag gemaakt, toen wij over de terugkaatsing van het geluid (124) en van de warmte (161) gehandeld hebben. Hunne eigenschap, dat alle evenwijdig invallende lichtstralen volmaakt in het brandpunt worden teruggekaatst, en dat hierbij dus niet die afwijking plaats heeft, die men bij de spherische spiegels spherische aberratie noemt, doet ze in alle gevallen, waarbij het op naauwkeurigheid of krachtige werking aankomt, boven laatstgenoemde verkiezen. Men gebruikt ze daarom bij voorkeur bij de teleskopen, die wij later zullen beschrijven. Holle spiegels worden gebruikt als vergrootspiegels en ook als brandspiegels, doch voor het laatste doel verdienen ook de parabolische de voorkeur.

De terugkaatsing door cilindervormige of kegelvormige spiegels is minder eenvoudig, hoewel ook dezelfde wetten daarbij gelden; men kan zich daarvan overtuigen door de zoogenaamde *anamorphosen*, dat zijn teekeningen, welke na terugkaatsing op eenen cilindrischen of op eenen kegelvormigen spiegel een zuiver beeld van het een of ander voorwerp geven. Die teekeningen zijn schijnbaar zoo verward, dat men er met geene mogelijkheid aan kan zien, van welke voorwerpen zij de teruggekaatste beelden voorstellen.

386. **Brandlijnen.** — Wanneer de lichtstralen van een lichtgevend punt door een gebogen oppervlak worden teruggekaatst, dan komen zij doorgaans niet in een zelfde punt te zamen. Twee lichtstralen echter, door nabijgelegene punten van het oppervlak teruggekaatst, zullen elkander kruisen, hetgeen tot eene versterking van het licht in het ontmoetingspunt aanleiding geeft. De vereeniging dier punten vormt eene meer verlichte kromme lijn, welke men *brandlijn* noemt. Fig. 373 stelt zoodanige brandlijn voor, verkregen door de terugkaatsing van het zonnelicht op den binnenkant van een cilindrischen spiegel; door eene goed gepolijste reep blik, die men met den hollen kant naar de zon gekeerd plaatst, kan men dit verschijnsel gemakkelijk duidelijk maken.

Fig. 373.



C. BREKING VAN HET LICHT.

387. Wetten der enkelvoudige breking van het licht. — Wij hebben hiervóór (372) gezegd, dat de lichtstralen volgens eene regte lijn worden voortgeplant, zoolang zij in dezelfde middenstof blijven. Gaan zij echter van de eene middenstof in eene andere over, dan veranderen zij van rigting, of zoo als men zegt, zij worden *gebroken*.

De breking of *refractie* der lichtstralen bij overgang in eene andere middenstof kan op twee verschillende wijzen geschieden; óf de gebrokene lichtstraal blijft na den overgang, even als daarvóór, enkelvoudig; of hij splitst zich bij de breking in twee stralen, die elk zijnen eigen weg gaan. In het eerste geval noemt men het verschijnsel *enkelvoudige straalbreking*, in het laatste *dubbele straalbreking*. Wij zullen ons vooreerst alleen met de enkelvoudige straalbreking bezig houden.

Zij AB (Fig. 374) een lichtstraal, die in de lucht wordt voortgeplant, en HI het grensvlak van eene andere middenstof, bijv. water, dan zal de lichtstraal daarin niet in dezelfde rigting BD worden voortgeplant, maar den weg BC volgen. Den hoek ABP tusschen den invallenden lichtstraal en de lijn BP, die loodregt staat op het scheidingsvlak HI, noemt men den *hoek van invalling*, den hoek CBN tusschen den gebroken lichtstraal en dezelfde loodlijn den *hoek van breking*. Bij de breking nu worden deze wetten waargenomen: 1°. de invallende en de gebrokene straal liggen altijd in een vlak, dat loodregt staat op het scheidingsvlak der beide middenstoffen; 2°. de verhouding tusschen den sinus van den hoek van invalling en den sinus van den hoek van breking is voor de twee zelfde middenstoffen standvastig en onafhankelijk van de helling van den invallenden straal. Wordt de hoek van invalling voorgesteld door i, die van breking door e, dan is dus $\frac{\sin i}{\sin e} = n$.

Fig. 374.



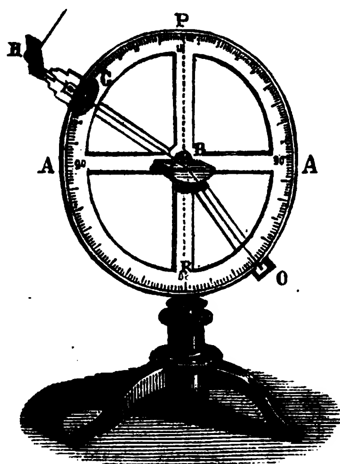
Aan het quotient n geeft men den naam van *brekings-exponent* of *index van refractie*.

Valt een lichtstraal loodregt op het scheidingsvlak, dan wordt hij niet gebroken, maar volgt ook in de andere middenstof dezelfde rigting. Dit blijkt uit de zoo even gemelde wet en wordt door de waarneming bevestigd.

Worden de beide middenstoffen verwisseld, zoodat de lichtstraal uit de digtere middenstof in de minder digte overgaat, dan wordt hij evenzeer gebroken; alsdan is de hoek van breking grooter dan de hoek van invalling. De verhouding van de sinussen dier beide hoeken is dan dezelfde, in dier voege echter dat men beide moet verwisselen. Is bijv. n de brekings-exponent van lucht in water, zoodat $\frac{\sin i}{\sin e} = n$ is, dan zal de brekings-exponent van water in lucht $\frac{1}{n}$ zijn; is nu e de hoek van invalling en i de hoek van breking, dan zal dus $\frac{\sin e}{\sin i} = \frac{1}{n}$ zijn, hetgeen geheel met de zoo even gegevene formule overeenkomt. Men is echter gewoon door brekings-exponent steeds dat quotient te verstaan, hetwelk men vindt, wanneer de gebrokene lichtstraal nader bij de loodlijn komt, of zoo als men het noemt, overgaat in eene middenstof van grooter straalbrekend vermogen. De brekings-exponent is dus altijd grooter dan de eenheid.

Men kan de straalbreking aantoonen door in eene donkere kamer een glazen bak met water, waarin eenig krijtpoeder zwevende is, te plaatsen en daarop een lichtbundel te laten vallen. Men bemerkt dan, dat de lichtstralen aan de oppervlakte van het water van rigting veranderen. Nog duidelijker kan men het verschijnsel maken door den in fig. 375 afgebeelden toestel, welke nagenoeg overeenkomt met den in fig. 360 voorgestelden, alleen met dit onderscheid dat het spiegeltje in het midden van den verdeelden cirkel is vervangen door een glazen bakje in den vorm van een halven cilinder. Laat men een lichtstraal daarop vallen, zoodat hij juist in het midden daarvan komt, dan volgt hij de rigting BO, en zal dus op een plaatje O kunnen worden opgevangen. Neemt men dan de grootte der hoeken GBP en RBO waar, dan zal men de verhouding hunner sinussen of den brekings-exponent kunnen berekenen. Verandert men daarna den hoek van invalling, waardoor ook de hoek van breking verandert, dan kan men andermaal de ver-

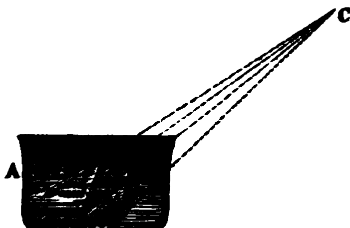
Fig. 375.



houding tusschen hunne sinussen berekenen, en zal daarvoor dezelfde waarde vinden.

388. Verschijnselen, door de breking van het licht veroorzaakt. — In een kommetje of bakje A (Fig. 376) met ondoorschijnende wanden, legt men een geldstukje B of iets dergelijks, en plaatst het oog in C, zoodat men door den wand verhinderd wordt B te zien. Laat men nu in het bakje water schenken, terwijl men het oog steeds op dezelfde plaats houdt, dan bemerkt men weldra het geldstukje, dat als 't ware schijnt opgeligt te worden. Dat moet alleen daaraan worden toegeschreven, dat de van B uitgaande lichtstralen aan het scheidingsvlak bij D gebroken worden en den weg BDC volgen, zoodat het in C geplaatste oog het geldstukje in de rigting CDE en niet in de rigting CB ziet. Om dezelfde reden schijnt een stok, dien men gedeeltelijk in het water houdt, gebroken, althans wanneer men hem schuins houdt.

Fig. 376.



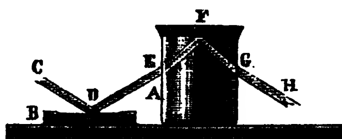
Het verschijnsel van het schijnbaar opligten van het geldstukje in het bakje met water heeft in het groot in den dampkring plaats en is oorzaak, dat wij de zon en de sterren zelfs boven den horizon zien, wanneer zij zich eigenlijk nog daaronder bevinden. De dampkring kan beschouwd worden als bestaande uit verschillende lagen van ongelijke digtheid, en wel van geringere digtheid, naarmate zij verder van de oppervlakte der aarde verwijderd zijn. De lichtstraal, van eene ster uitgaande, volgt dus geen regten weg, maar eenen telkens gebrokenen, of eigenlijk, daar de digtheid der lucht allengskens toeneemt, eene kromlijnige rigting. Men zal dus ligtelijk inzien hoe het mogelijk is, dat de lichtstralen, van de zon of eene ster uitgaande, terwijl deze zich nog onder den horizon bevindt, toch tot ons oog komen, en ons dan den indruk maken, alsof dat hemelligchaam reeds boven den horizon aanwezig is. Men noemt dit verschijnsel de astronomische straalbreking. Het verschil is des te aanzienlijker naarmate de ster lager staat; bevindt zij zich vlak boven ons hoofd, of zooals men het noemt, in het zenith, dan is de straalbreking nul, omdat de lichtstralen dan loodregt op den dampkring invallen en dus niet gebroken worden.

389. Grenshoek, totale terugkaatsing. — Bij het overgaan van

een lichtstraal in eene middenstof van geringer brekingsvermogen kan zich nog een bijzonder verschijnsel voordoen. Daar volgens de formule $\frac{\sin i}{\sin e} = \frac{1}{n}$ moet zijn, wanneer namelijk i de hoek van invalling en e de hoek van breking voorstelt, zoo kan zich het geval voordoen, dat $n \sin i$ grooter dan de eenheid wordt. Daar $\sin e = n \sin i$ is, wordt alsdan e onbestaanbaar. Dit leert ons, dat in zoodanig geval de lichtstraal niet wordt gebroken; hij wordt dan door het scheidingsvlak der beide middenstoffen geheel teruggekaatst; dit is hetgeen men *totale terugkaatsing* noemt. De grootste waarde, die e kan hebben, is 90°, in welk geval $\sin e = 1$ moet zijn; alsdan is $\sin i = \frac{1}{n}$. Die waarde van den hoek van invalling, waarvan de sinus gelijk is aan den brekings-exponent bij den overgang in eene stof van geringer straalbrekend vermogen, noemt men den *grenshoek*, omdat er bij de minste vergrooting van dien hoek geene breking, maar enkel terugkaatsing plaats heeft.

Men kan de totale terugkaatsing duidelijk maken door achter een met water gevuld glazen vat A (Fig. 377) een horizontaal spiegeltje D te plaatsen, waardoor een van C uitgaande lichtbundel volgens de rigting DE wordt teruggekaatst; is het oog dan in H geplaatst en ziet men in de rigting HG, dan zal men een beeld van het in C geplaatste voorwerp waarnemen, daar de lichtbundel DEF niet uit de vloeistof treedt, maar door hare oppervlakte wordt teruggekaatst. Een voorwerp, dat zich ergens boven F bevindt, neemt men om dezelfde rede niet waar.

Fig. 377.



Men kan hetzelfde verschijnsel ook waarnemen, wanneer men in een glas met water een ledig reageerbuisje in eenen eenigzins schuinen stand plaatst en dan van boven in het water ziet. De schuins op den wand van het buisje invallende lichtstralen worden dan daardoor teruggekaatst, omdat zij niet van het water in de lucht kunnen overgaan; het buisje ziet er dan uit, alsof het met kwikzilver gevuld was. Schenkt men het vol water, dan houdt het verschijnsel aanstonds op.

390. **Breking in eene middenstof, door evenwijdige vlakken begrensd.** — Wij hebben zoo even reeds de opmerking gemaakt, dat zoo n de breking-exponent is wanneer een lichtstraal van eene middenstof in eene andere overgaat, die exponent juist het omgekeerde zal wezen, wanneer die

beide stoffen onderling verwisseld worden. Gaat nu een lichtstraal AB (Fig. 378) van de lucht over in eene andere middenstof, bijv. glas, dan verandert aan de oppervlakte PQ de rigting van dien straal in dier voege, dat $\frac{\sin ABE}{\sin FBC} = n$ is; daarna gaat de lichtstraal regtlijnig voort, tot hij aan het andere vlak MN komt; is dat vlak evenwijdig met PQ, dan moet hoek BCG = hoek FBC zijn. Volgt de aan het scheidingsvlak MN gebroken lichtstraal de rigting CD, dan zal hier $\frac{\sin BCG}{\sin DCH} = \frac{1}{n}$ zijn; deze vergelijking in verband brengende met de beide voorgaande, vindt men dat de hoeken ABE en DCH gelijk zijn, waaruit blijkt, dat de lijn CD evenwijdig is aan AB, en dat dus de rigting van den invallenden en van den uittredenden straal dezelfde is, wanneer het licht door een ligchaam met evenwijdige grensvlakken gaat.

Fig. 378.

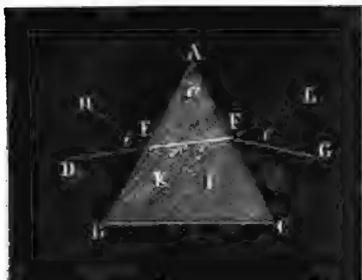


391. **Breking van het licht in een prisma.** — Wat men door een prisma in de meetkunde verstaat, mogen wij als bekend onderstellen; bij de leer van het licht bedoelt men daarmede, zoo als ook reeds bij de behandeling der warmteleer (171) is gezegd, eene doorschijnende middenstof, begrensd door twee niet evenwijdige platte vlakken, welke dus, mits genoegzaam verlengd, elkander volgens eene regte lijn snijden. Laat men door zoodanig prisma een vlak gaan, loodregt op die lijn of ribbe, dan verkrijgt men eene *hoofddoorsnede*, welke dus eigenlijk slechts bestaat uit twee lijnen, die elkander snijden. Den hoek tusschen die twee lijnen, die niets anders dan de tweevlakkige hoek of standhoek der beide grensvlakken is, noemt men den *brekingshoek* van het prisma. Om de breking der lichtstralen in een prisma voor te stellen, bepaalt men zich tot de afbeelding van die hoofddoorsnede, zoo als in fig. 379, waaraan men dan doorgaans de gedaante van een gelijkbeenigen driehoek ABC geeft. De lijn BC noemt men de *basis* van het prisma.

Den weg, dien een lichtstraal in het prisma, dat wij van glas onderstellen, aflegt, kunnen wij gemakkelijk bepalen. Zij D het lichtgevend punt en DE een lichtstraal, dan zal deze bij E gebroken worden en den weg EF volgen; noemt men hoek DEH i en hoek IEF r, dan is $\frac{\sin i}{\sin r} = n$. Bij F geko-

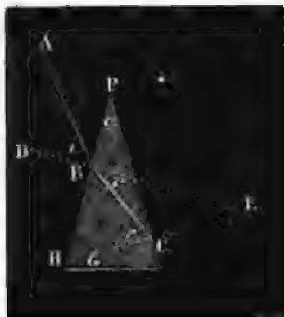
men heeft er andermaal eene breking plaats bij den overgang van het glas in de lucht; stelt men hoek EFK $= r'$ en hoek LFG $= e$, en is dus $\frac{\sin r}{\sin e} = \frac{1}{n}$, dan zal FG de rigting van den gebroken lichtstraal zijn. De straal, die volgens DE op het prisma valt, verlaat het dus in de rigting FG. Is het oog in G geplaatst, dan ziet men een voorwerp, dat zich in D bevindt volgens de rigting GF, dus veel hooger, zoodat het als 't ware opgeligt schijnt. Men kan zich gemakkelijk proefondervindelijk overtuigen, welke rigting de lichtstralen door een prisma nemen, wanneer men in een donker vertrek een lichtstraal op een glazen prisma vallen laat, dat men op een voet bevestigd heeft, en het gevormde beeld dan op een scherm of op een witten muur opvangt. Daarbij zijn nog andere verschijnselen op te merken, daar het beeld alsdan gekleurd is; hierop komen wij echter later terug.

Fig. 379.



892. Totale terugkaatsing bij de prisma's. — Wij hebben hiervóór gezien, dat wanneer een lichtstraal uit de eene middenstof overgaat in eene andere van geringer straalbrekend vermogen, het geval zich kan voordoen, dat er geen breking maar enkel terugkaatsing plaats heeft. Dat verschijnsel moet zich onder zekere omstandigheden ook kunnen voordoen aan het vlak van het prisma, waar de reeds eenmaal gebrokene lichtstraal andermaal gebroken wordt. Dit zal het geval zijn, wanneer de hoek EFK (Fig. 379) gelijk wordt aan den grenshoek. Om na te gaan hoe groot de hoek moet zijn, waaronder het licht op het prisma invalt, opdat dit verschijnsel plaats grijpe, moeten wij de onderlinge betrekking van die hoeken nagaan. Zij AB (Fig. 380) de invallende lichtstraal, en DAB $= i$ de hoek van invalling, BC de gebrokene lichtstraal en dus EBC $= r$ de hoek van breking, dan is $\sin i = n \sin r$; de gebrokene lichtstraal ontmoet bij C het andere oppervlak, doch

Fig. 380.



komt er, zoo als wij onderstelden, niet uit, daar de hoek BCG $= r'$ juist gelijk is aan den grenshoek. Daar nu uit de figuur blijkt, dat $r = r' - a$, zoo zal men, deze waarde in de plaats stellende, vinden:

$$\sin i = n \sin (r' - a) = n (\sin r' \cos a - \cos r' \sin a).$$

Daar r' de grenshoek is, zoo is $\sin r' = \frac{1}{n}$ en $\cos r' = \frac{1}{n} \sqrt{(n^2 - 1)}$, zoodat

$$\sin i = \cos a - \sin a \sqrt{(n^2 - 1)},$$

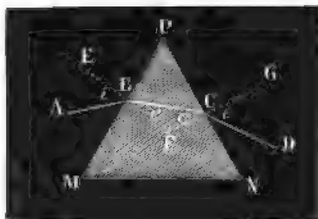
welke formule de betrekking aanduidt tusschen den hoek van invalling, den brekingshoek van het prisma en den brekings-exponent. Voor elke grootere waarde van i zal de gebrokene lichtstraal op het vlak DC totaal teruggekaatst worden.

Wordt nu a grooter, dan wordt $\sin i$ en dus ook i kleiner; is a gelijk aan den grenshoek l, dan moeten voor $\cos a$ en $\sin a$ de waarden worden in de plaats gezet, zoo even voor $\cos r'$ en $\sin r'$ opgegeven; men vindt dan $\sin i = 0$, en dus ook $i = 0$. Is dus de brekingshoek van het prisma gelijk aan den grenshoek, dan zal een lichtstraal, die loodregt op het eene vlak invalt, door het andere noch doorgelaten, noch teruggekaatst worden. De lichtstralen, die gelegen zijn binnen den hoek DBP, worden aan de oppervlakte BC teruggekaatst; die welke binnen den hoek DBH gelegen zijn, treden aan het vlak PC uit. Is de brekingshoek a grooter dan de grenshoek, dan wordt $\sin i$ en dus ook i negatief; de straal, die niet uit het prisma treedt, is dan tusschen de beenen van den hoek DBH gelegen. Is eindelijk de brekingshoek a gelijk aan den dubbelen grenshoek l, dan wordt $\sin i = \cos 2l - \sin 2l \sqrt{(n^2 - 1)}$; plaatst men hierin de waarden van $\cos 2l$ en $\sin 2l$, die men kan afleiden uit de waarde $\sin l = \frac{1}{n}$, dan vindt men $\sin i = -1$, waaruit blijkt, dat in dit geval de straal, die op het tweede vlak noch teruggekaatst, noch doorgelaten wordt, evenwijdig zoude moeten zijn met het eerste vlak. Een straal, die met dat vlak een hoek, hoe klein ook, maakt, kan dus niet worden doorgelaten, wanneer de brekingshoek gelijk is aan of grooter dan de dubbele grenshoek.

Men kan deze verschillende eigenschappen gemakkelijk aantoonen door middel van glazen prisma's. De grenshoek van het glas bedraagt 41° 48′; een glazen prisma, waarvan de brekingshoek grooter is dan het dubbel van deze waarde, laat dus geen licht door; door zoodanig prisma kan men dus de voorwerpen niet zien.

393. Kleinste afwijking. — Uit hetgeen hiervóór is gezegd over de verandering in rigting, welke een lichtstraal aan de beide grensvlakken van een prisma ondergaat, blijkt, dat de rigting van den invallenden en die van den uittredenden lichtstraal aanmerkelijk verschillen; dat verschil in rigting noemt men de afwijking. Deze kan gemakkelijk worden uitgedrukt door middel van de hoeken, welke de tweemaal gebroken lichtstraal met die vlakken maakt. Zij in fig. 381 de brekingshoek van het prisma a, de hoek van invalling i, de hoek van breking r, de hoek waaronder de eenmaal gebroken lichtstraal op het vlak PN invalt r', en de hoek GCD, waaronder hij het prisma verlaat, e, dan is in de eerste plaats $a = r + r'$, hetgeen terstond uit de figuur blijkt. De afwijking d wordt uitgedrukt door de som der afwijkingen $i - r$ en $e - r'$, welke de lichtstraal in B en in C ondergaat, dus door $i + e - r - r'$, of, daar $r + r' = a$ is, moet $d = i + e - a$ zijn. De afwijking hangt dus af van i en van e; zij zal hare geringste waarde verkrijgen, wanneer i en e onderling gelijk zijn (1). De kleinste afwijking wordt dus uitgedrukt door de formule $D = 2i - a$, en kan dus gemakkelijk worden berekend, wanneer de hoek van invalling i en de brekingshoek a van het prisma bekend zijn.

Fig. 381.



(1) Deze eigenschap wordt met behulp van hoogere wiskunde zeer gemakkelijk bewezen. Door elementaire beschouwingen kan men haar op de volgende wijze duidelijk maken.

Voegt men de twee vergelijkingen $\sin i = n \sin r$ en $\sin e = n \sin r'$ bij elkander, dan verkrijgt men $\sin i + \sin e = n (\sin r + \sin r')$, of na herleiding,

$$\sin \tfrac{1}{2} (i + e) . \cos \tfrac{1}{2} (i - e) = n \sin \tfrac{1}{2} (r + r') . \cos \tfrac{1}{2} (r - r').$$

Daar echter $i + e = d + a$ en $r + r' = a$ is, zoo verandert deze vergelijking in de volgende:

$$\sin \tfrac{1}{2} (a + d) = n \sin \tfrac{1}{2} a . \frac{\cos \tfrac{1}{2} (r - r')}{\cos \tfrac{1}{2} (i - e)} .$$

De afwijking d zal klaarblijkelijk hare kleinste waarde bereiken, wanneer $\sin \frac{1}{2} (a + d)$ zijn minimum bereikt; want $\frac{1}{2} (a + d)$ is altijd kleiner dan 90°, omdat $a + d = i + e$ is. Daar n en a niet veranderen, zal d dus haar minimum bereiken, als het quotient $\frac{\cos \frac{1}{2} (r - r')}{\cos \frac{1}{2} (i - e)}$ ook zijne kleinste waarde heeft. Van dit quotient is echter de teller altijd grooter dan de noemer, want i is grooter dan e en $i - r > e - r'$, of wat hetzelfde is, $i - e > r - r'$. De kleinste waarde van bovenstaand quotient zal dus plaats vinden, wanneer teller en noemer beide gelijk worden aan de eenheid, hetgeen het geval zal zijn, als $i = e$ en $r = r'$ is. De afwijking d zal dus haar minimum bereiken, als de hoeken i en e, als ook r en r', even groot zijn, dat is, als BPC een gelijkbeenige driehoek is.

Proefondervindelijk kan men gemakkelijk aantoonen, dat er inderdaad een minimum van afwijking plaats heeft. Laat men een lichtstraal loodregt op een glazen prisma in eene donkere kamer vallen, dan zal, wanneer men het prisma ronddraait om eene as, evenwijdig met de drie evenwijdige ribben, het beeld zich verplaatsen naar het punt, waar zich het beeld zoude gevormd hebben zonder door het prisma gegaan te zijn; blijft men ronddraaijen, zoodat de hoek van invalling kleiner wordt, dan verplaatst zich het beeld nog meer, tot dat het eindelijk terugkeert; in dien stand is dus de afwijking de geringste, en men kan dan, voor zooverre eene ruwe waarneming het toelaat, zien, dat de hoek van invalling en de hoek van uittreding onderling gelijk zijn, en dat het gedeelte van den lichtstraal binnen het prisma met de twee kanten een gelijkbeenigen driehoek PBC maakt.

394. **Bepaling van den brekings-exponent voor vaste ligchamen, vochten en gassen.** — De bepaling van den brekings-exponent kan het gemakkelijkst geschieden door de waarneming van de kleinste afwijking. De boven gevonden formule $D = 2i - a$ geeft ons $i = \frac{1}{2}(D + a)$; uit de formule $2r = a$ volgt $r = \frac{1}{2}a$; substitueert men deze waarden in de formule $\sin i = n \sin r$, dan volgt er uit

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2}(D + a)}{\sin \frac{1}{2}a},$$

door welke formule de brekings-exponent kan berekend worden, als men den hoek der kleinste afwijking en den brekingshoek van het prisma kent.

Men moet dus, om den brekings-exponent eener doorschijnende stof te bepalen, een prisma van die stof nemen, en daarvan met naauwkeurigheid den brekingshoek bepalen. Om den hoek der kleinste afwijking te vinden, plaatst men het prisma in vertikalen stand op een standaard, zoodanig dat het om eene vertikale as kan draaijen, en kijkt door een kijker naar een zeer ver verwijderd punt, eerst regtstreeks en dan door het prisma heen, en draait het prisma zoo lang tot dat de hoek, dien de twee verschillende standen van den kijker met elkander maken, zoo klein mogelijk is. Deze hoek, dien men op een verdeelden cirkel, waarop de kijker bevestigd is, kan aflezen, is dan de hoek der kleinste afwijking; door de bovenstaande formule kan men vervolgens den brekings-exponent berekenen.

Wil men den brekings-exponent eener vloeistof bepalen, dan bedient men zich van een hol glazen prisma, waarvan de wanden zijn vervaardigd uit glazen platen, wier oppervlakken volmaakt evenwijdig moeten zijn, en schenkt

dit vol met het te onderzoeken vocht. Men kan ook een glazen prisma nemen, waarin men eene cilindrische opening heeft geboord; men sluit die opening dan door twee glazen platen met volkomen evenwijdige oppervlakken, en schenkt de vloeistof daarin door eene andere kleine opening, welke tot de eerstgenoemde toegang verschaft.

Ook de brekings-exponent der gassen kan op dergelijke wijze gezocht worden. Biot en Arago bedienden zich van eene glazen buis, die aan hare uiteinden schuins bijgeslepen en door glazen platen gesloten was. Door eene kraan kon de lucht er uitgepompt en een ander gas er binnen gelaten worden. De buis was bovendien in gemeenschap met eene klok, waarin zich een barometer bevond, ten einde de drukking van het gas te kunnen waarnemen. Men moet eerst den brekings-exponent der dampkringslucht bepalen, en maakt te dien einde de buis luchtledig. Daarna vult men de buis met een ander gas, en bepaalt den brekings-exponent van dat gas en de lucht; om dan den exponent van het gas en het luchtledige te vinden, heeft men slechts de verhouding te zoeken tusschen den exponent van het gas en de lucht, en dien van de lucht en het luchtledige. Zoodanigen brekings-exponent noemt men den volstrekten brekings-exponent.

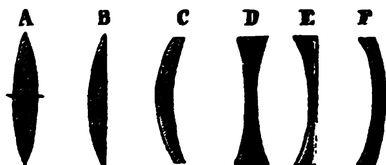
In de hier volgende tafel komen de brekings-exponenten van eenige vaste ligchamen, vloeistoffen en gassen voor.

Diamant	2,470.	Klipzout.	1,545.
Zwavelkristal	2,115.	Salpeter	1,527.
Feldspath	1,764.	Crownglas	1,500.
Smaragd.	1,585.	IJslands kristal . . .	1,456.
Flintglas	1,570.	Vloeispath	1,436.
Bergkristal.	1,547.	IJs	1,310.
Zwavelkoolstof . . .	1,678.	Salpeterzuur	
Lijnolie	1,485.	(digtheid = 1,48) .	1,410.
Olijfolie	1,470.	Sterk zoutzuur . . .	1,410.
Terpentijnolie	1,470.	Alcohol	1,372.
Zwavelzuur		Zwavelether	1,358.
(digtheid = 1,7) . . .	1,429.	Water	1,336.
Lucht	1,000294.	Chloorgas	1,000772.
Zuurstofgas.	1,000272.	Koolzuurgas	1,000449.
Waterstofgas	1,000138.	Koolwaterstofgas (ligt) .	1,000678.
Stikstofgas	1,000300.	Ammoniakgas	1,000385.

De brekingsexponenten van de vaste ligchamen en vloeistoffen zijn die, welke worden waargenomen, wanneer de lichtstraal uit de lucht daarin overgaat; die van de gassen daarentegen, wanneer de lichtstraal uit het luchtledige komt.

395. Lenzen. — Door eene *lens* verstaat men een doorschijnend ligchaam, begrensd door twee gebogene oppervlakken. Zijn die oppervlakken bolvormig, dan noemt men de lenzen spherische of bolvormige; het zijn deze, die bij de leer van het licht het meest gebruikt worden. Men onderscheidt ze echter in verschillende soorten; ten eerste die, welke de eigenschap hebben van de lichtstralen tot elkander te brengen en daarom convergerende lenzen genoemd worden; ten tweede die, waardoor de lichtstralen van elkander wijken, en die daarom divergerende lenzen heeten. De eerste herkent men daaraan, dat zij in het midden dikker zijn dan aan den rand, terwijl bij de laatste het tegenovergestelde het geval is. In het geheel zijn er zes soorten van lenzen mogelijk, welke allen in fig. 382 zijn afgebeeld. De eerste A heet *dubbel-bolvormig* of *bi-convex*, B is *plat-bolvormig* of *plan-convex*, C *hol-bolvormig* of *convergerend concaaf-convex*; deze allen zijn convergerende lenzen. De in D afgebeelde is eene *bi-concave* of *dubbel-concave* lens, die in E eene *plan-concave* en die in F een *divergerende concaaf-convexe* lens. De beide lenzen B en E komen wel is waar niet volkomen overeen met de hiervóór gegevene bepaling; maar men kan het platte vlak, waardoor zij aan den eenen kant begrensd zijn, beschouwen als het oppervlak van een bol met een oneindig grooten straal.

Fig. 382.



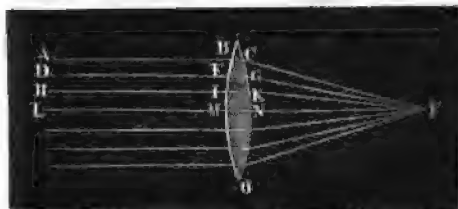
Het middenpunt van het bolvormig oppervlak eener lens heet haar *middenpunt van kromming;* de *as* is de lijn, die door de middenpunten van kromming van de beide oppervlakken gaat. Is een dier oppervlakken een plat vlak, dan is de as de lijn, die uit het middenpunt van kromming van het bolvormig oppervlak loodregt op dat plat vlak wordt getrokken.

Wij zullen ons in de volgende bladzijden bepalen tot eene beschouwing der bi-convexe en bi-concave lenzen, welke het meest gebruikt worden; de eigenschappen der andere kunnen daaruit zonder veel moeite worden afgeleid.

396. Bi-convexe lenzen. — Wanneer de lichtstralen van eene zoo

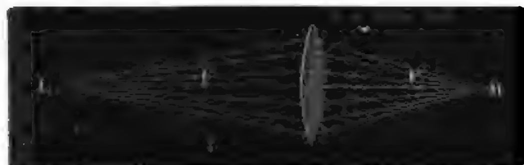
verwijderde lichtbron op eene dubbel-bolvormige lens invallen, dat men ze als evenwijdig kan beschouwen, zoo als bijv. het geval is met de zonnestralen, dan bemerkt men, dat de door de lens gebrokene stralen nagenoeg in één punt aan de andere zijde van de lens zamen komen, zooals in fig. 383 is voorgesteld; dit zamenvallen in één punt zal des te scherper zijn, naarmate het aantal graden van het bolvormig oppervlak geringer is; is dit niet grooter dan 10°, dan is de convergentie in één punt vrij naauwkeurig. Dit punt heet het *brandpunt* of ook wel het *hoofdbrandpunt*; het is in fig. 383 voorgesteld door F. De plaats van het brandpunt hangt niet alleen af van de kromming van het oppervlak, maar ook van den brekingsexponent. Men kan dus geen algemeenen regel geven, om zijne plaats te bepalen. Voor crownglas valt het nagenoeg zamen met het middenpunt van kromming van het bolvormig oppervlak BMO. De afstand FN wordt brandpunts-afstand genoemd. Aan elk der beide kanten is een hoofdbrandpunt gelegen; zijn de beide oppervlakken van gelijke kromming, dan is ook voor beide de brandpuntsafstand gelijk.

Fig. 383.



Bevindt zich het lichtgevend punt op een geringeren afstand, bijv. in L in fig. 384, welk punt echter verder van de lens verwijderd is dan het hoofdbrandpunt F, dan worden de stralen gebroken op de in de figuur voorgestelde wijze. Daar de hoek van invalling der lichtstralen nu grooter is dan wanneer zij evenwijdig zijn, zoo zullen de lichtstralen na het verlaten der lens minder convergeren. Zij ontmoeten nogtans elkander, maar nu in een punt M, dat verder van de lens verwijderd is dan het hoofdbrandpunt F'. Het laat zich ligt inzien, dat wanneer het lichtgevend punt in M geplaatst was, de gebrokene stralen omgekeerd in L zouden zamen komen. Om deze reden noemt men de punten L en M *koppelbrandpunten*.

Fig. 384.

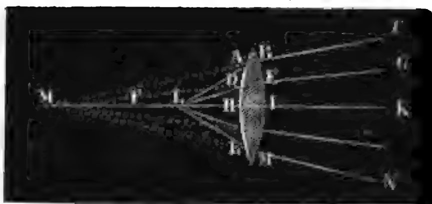


Bevindt het lichtgevend punt zich in het hoofdbrandpunt F (Fig. 383), dan

zullen de gebrokene stralen nog minder convergeren; men zal gemakkelijk inzien, dat zij in dit geval evenwijdig zijn.

Plaatst men eindelijk het lichtgevend punt tusschen het hoofdbrandpunt en de lens, zooals L in fig. 385, dan zullen de gebrokene stralen divergeren. Verlengt men ze dan echter aan den tegenovergestelden kant van de lens, dan komen zij zamen in een punt M, dat men *virtueel brandpunt* noemt.

Fig. 385



Men kan zich van deze eigenschappen der bi-convexe lenzen gemakkelijk overtuigen door in een donker vertrek op eene tamelijk groote glazen lens lichtstralen te laten vallen, hetzij van de zon, wanneer men evenwijdige stralen verlangt, hetzij van eene lamp of kaars, wanneer men eene minder verwijderde lichtbron wil. Maakt men van de zonnestralen gebruik, dan kan men zeer gemakkelijk de plaats van het hoofdbrandpunt proefondervindelijk bepalen, door eenvoudig achter de lens een scherm te houden en daarop het beeld op te vangen. Men merkt het dan aanstonds, wanneer het scherm zich in het punt bevindt, waar alle stralen zamen loopen.

Voor plat-bolvormige lenzen gelden dergelijke eigenschappen; zij hebben eveneens een hoofdbrandpunt, waar de op de andere zijde invallende evenwijdige lichtstralen zamen komen.

397. **Bi-concave lenzen.** — Vallen op eene bi-concave lens evenwijdige stralen in, zooals in fig. 386 de stralen CD en EG, dan zullen zij na breking divergeren in de rigtingen HI en KL. Er wordt dus geen brandpunt

Fig. 386.

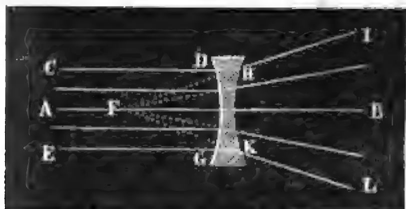


Fig. 387.



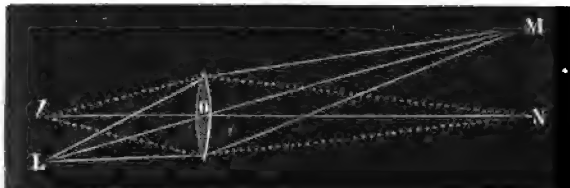
gevormd. Verlengt men echter deze rigtingen, dan zullen zij de as AB ont-

moeten in een punt F, waaraan men den naam van virtueel hoofdbrandpunt geeft.

Loopen de invallende lichtstralen niet evenwijdig, maar komen zij van een op de as gelegen punt L (Fig. 387), dan zullen zij nog sterker divergeren; verlengt men ze dan weder, tot zij de as AB ontmoeten in een punt M, dan zal dit het virtuele koppelbrandpunt van L zijn. Bij eene plan-concave lens neemt men dergelijke eigenschappen waar.

398. **Neven-assen.** — De voorgaande beschouwingen hebben alle betrekking op punten in de hoofdas der lens gelegen. Het kan echter ook gebeuren, dat zich een lichtgevend punt niet in die as bevindt. De lijn, die men dan van dat punt naar het midden der lens trekt, zoo als LOM in fig. 388, noemt men eene *neven-as.*

Fig. 388.



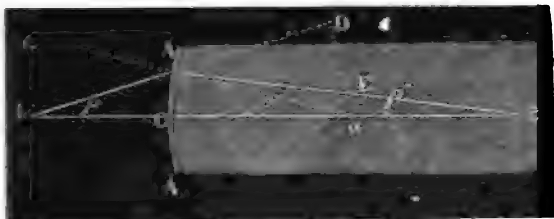
Maakt de neven-as slechts eenen geringen hoek met de hoofdas, dan gelden daarvoor dezelfde eigenschappen, die hiervóór zijn vermeld voor de hoofdas. De lichtstralen, van een punt L uitgaande, zullen elkander weder ontmoeten in een punt M. De afstand van het punt M tot O is dezelfde als die van N tot dat punt, wanneer namelijk l en N twee koppelbrandpunten in de hoofdas zijn, en $LO = lO$ is.

Het punt O heet doorgaans het *optisch middenpunt;* het heeft de eigenschap, dat een door dit punt gaande lichtstraal niet van rigting verandert, hetgeen daaraan is toe te schrijven, dat de bolvormige oppervlakken in de punten, waar de straal ze ontmoet, of liever de rakende vlakken in die punten, evenwijdig zijn. De rigting blijft dus dezelfde, en het is om deze reden, dat men zoodanige lijn als LOM dan ook als eene neven-as kan beschouwen.

399. **Formule voor de bolvormige lenzen.** — Wij hebben de eigenschappen van de lenzen hiervóór niet voor elk geval afzonderlijk bewezen, omdat zij kunnen worden afgeleid uit eene enkele formule, welke de betrekking tusschen de brandpunts-afstanden en den straal van het bolvormige oppervlak uitdrukt. Wij zullen in de eerste plaats die formule trachten af te leiden, om haar daarna op eenige bijzondere gevallen toe te passen.

Beschouwen wij te dien einde eerst het geval, dat de lichtstralen uit de lucht invallen op een bolvormig oppervlak, zoo als in fig. 389 in doorsnede is voorgesteld. Zij L het lichtgevend punt, en ACA′ de cirkelboog, dien wij onderstellen van een gering aantal graden te zijn en dus zeer klein ten opzigte van den straal AO. De lichtstraal LA zal in A gebroken worden, en in de andere middenstof eene rigting AB volgen, zoodat hij de as in een punt B ontmoet. Om den afstand BC te vinden trekt men OD en OE loodregt op LA en AB. Daar men AC kan beschouwen als een regt lijntje en den hoek

Fig. 389.



in C als een regten hoek, zoo zijn de driehoeken LCA en LDO gelijkvormig, zoodat LO : OD = LA : AC. Eveneens geven de gelijkvormige driehoeken BAC en BOE de evenredigheid BO : OE = AB : AC. Drukt men nu AL en LC, die men als gelijk mag beschouwen, uit door p, en AB en BC, die ook gelijk ondersteld mogen worden, door p', terwijl de straal OA = OC = r gesteld wordt, dan worden deze twee evenredigheden $p + r$: OD = p : AC en $p - r$: OE = p' : AC, waaruit men afleidt

$$\frac{p+r}{p'-r} = \frac{p}{p'} \cdot \frac{OD}{OE}.$$

Nu is het echter uit de figuur duidelijk, dat OD en OE niets anders zijn dan de sinussen der hoeken van invalling en van breking, en dat dus $\frac{OD}{OE}$ door den brekings-exponent n kan worden vervangen. Zet men deze waarde in de plaats en herleidt men de formule, dan vindt men

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p'} = \frac{n-1}{r},$$

welke de betrekking aanduidt tusschen de afstanden p en p', den straal r en den brekings-exponent n.

Heeft men nu eene lens, zoodat de lichtstraal eene tweede maal gebroken wordt, dan zal men voor die tweede breking dezelfde formulen moeten in toepassing brengen. In fig. 390 zij ABC de lens en L het lichtgevend punt,

LM de invallende, MN de eenmaal gebrokene en NP de tweemaal gebrokene of uittredende lichtstraal, die de as in P ontmoet, dan hebben wij, wanneer

Fig. 390.



de lichtstraal MN verlengd wordt tot hij de as in S ontmoet, hetzelfde geval als het zooeven behandelde. Is dus LM = LB = p, NO′ = r, dan is

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{\mathrm{BS}} = \frac{n-1}{r}.$$

Nu is echter niet NS of het verlengde van MN de uittredende straal, maar NP, zoodat wanneer NP en DP gelijk ondersteld en door p' aangeduid worden, terwijl de straal NO door r' wordt aangewezen, men hebben zal

$$\frac{1}{p'} - \frac{n}{\mathrm{DS}} = \frac{n-1}{r'};$$

het teeken voor den tweeden term is negatief, omdat het verlengde van MN hier aan denzelfden kant ligt als het punt P. Is nu de kromming van de lens en dus ook hare dikte zeer gering, dan kan men BD verwaarloozen en BS = DS stellen. Door optelling van de beide gevondene vergelijkingen vindt men dan

$$(\alpha) \qquad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{n-1}{r} + \frac{n-1}{r'} = \frac{(n-1)\,(r+r')}{rr'}.$$

Onderstellen wij, dat wij eene dubbel-bolvormige lens hebben, wier oppervlakken gelijke stralen hebben, dan wordt deze formule

$$(\beta) \qquad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2\,(n-1)}{r}.$$

Vallen de stralen evenwijdig in, dan is $p = \infty$ en dus $\frac{1}{p} = 0$; de formule

geeft dan $p' = \frac{r}{2(n-1)}$; deze uitdrukking is dus eigenlijk de waarde van den afstand van het hoofdbrandpunt tot de lens; drukt men dien door a uit, dan verkrijgt de formule (β) de nog eenvoudiger gedaante

$$(\gamma) \qquad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}.$$

De waarde $a = \frac{r}{2(n-1)}$ doet zien, dat de brandpunts-afstand toeneemt met den straal, en dat hij juist gelijk moet zijn aan den straal, wanneer $2(n-1) = 1$, of wat hetzelfde is, $n = \frac{3}{2}$. Dit is, zooals hiervóór is opgemerkt, voor het gewone glas nagenoeg het geval.

De formule (α) kan ook toepasselijk gemaakt worden op eene plan-convexe lens, door namelijk $r' = \infty$ te stellen; alsdan is $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{n-1}{r}$, waaruit blijkt, dat de brandpunts-afstand in dit geval slechts de helft bedraagt van dien bij bi-convexe lens.

Men kan de voorgaande formulen ook toepasselijk maken op de divergerende lenzen, door de teekens van p en p' beide te veranderen; het is duidelijk, dat a dan altijd eene negatieve waarde moet hebben, hetgeen overeenkomt met het hiervóór opgemerkte, dat bij zoodanige lenzen geen eigenlijke maar slechts virtuele brandpunten ontstaan.

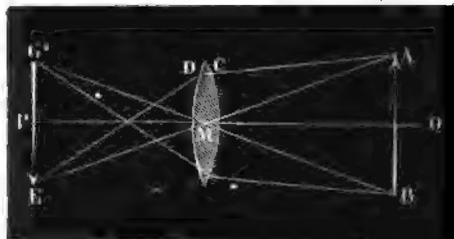
Uit de formule (γ) kan men gemakkelijk alle gevallen afleiden, die wij boven hebben beschouwd. Neemt p af, dan moet p' toenemen en omgekeerd; maar hoe groot p' ook genomen worde, mits niet oneindig, altijd zal $p > a$ zijn, dat is, het koppelbrandpunt ligt altijd verder van de lens dan het hoofdbrandpunt. Is $p' = 2a$, dan is ook $p = 2a$; bevindt het lichtgevend punt zich dus op den dubbelen brandpunts-afstand, dan komen de stralen aan den anderen kant juist op gelijken afstand te zamen. Wordt $p < a$ dan moet p' negatief worden; is het lichtgevend punt dus tusschen het hoofdbrandpunt en de lens gelegen, dan ontstaat er een virtueel koppelbrandpunt. Voor divergerende lenzen is a negatief; p en p' zullen dus òf beide òf althans een van beide negatief moeten zijn; het brandpunt is in dit geval altijd virtueel en tusschen de lens en hoofdbrandpunt gelegen, dat zelf ook virtueel is en op een afstand a van de lens verwijderd is.

400. **Beelden, door de lenzen gevormd.** — Even als bij de gebogene spiegels worden er ook bij de lenzen beelden gevormd, die even als

daar eigenlijk de verzameling zijn van de koppelbrandpunten van de verschillende punten van het voorwerp.

Beschouwen wij in de eerste plaats eene dubbel-bolvormige lens, en stellen wij, dat van een voorwerp AB (Fig. 391) lichtstralen uitgaan. Een van A uitgaande lichtstraal AC wordt bij C en daarna bij D gebroken, om in de rigting DE verder te gaan; de lichtstraal AME, die door het optisch middenpunt der lens gaat en dus eene neven-as is, ontmoet de lijn DC in E, welk punt dus het koppelbrandpunt van A is. Evenzoo zal men eene reeks van punten vinden, waar de van andere punten van het voorwerp uitgaande stralen elkander ontmoeten; de vereeniging EG dier punten zal dus het beeld van het voorwerp vormen.

Fig. 391.



Het laat zich aanstonds inzien, dat het beeld omgekeerd moet zijn; de grootte hangt echter af van den afstand van het voorwerp tot de lens. Is die afstand grooter dan de dubbele brandpunts-afstand, dan zal het beeld kleiner zijn dan het voorwerp; is die afstand juist gelijk aan den dubbelen brandpunts-afstand, dan wordt het beeld op gelijken afstand aan den anderen kant der lens gevormd, en zal dus even groot zijn als het voorwerp. Is de afstand kleiner dan de dubbele, doch grooter dan de enkele brandpunts-afstand, dan zal het beeld op grooteren afstand van de lens gevormd worden en dus grooter zijn. De gelijkvormigheid der driehoeken ABM en EGM doet het aanstonds zien, dat de grootte van het beeld en van het voorwerp tot elkander in reden moeten zijn als hunne afstanden van de lens, en dat dus de maat der vergrooting door de verhouding tusschen die twee afstanden wordt uitgedrukt.

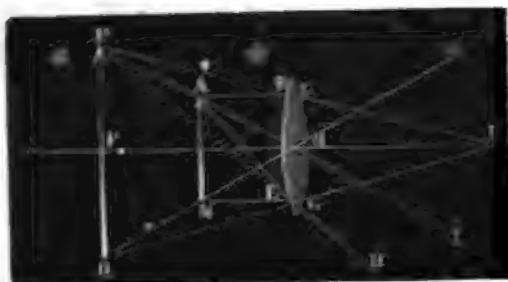
Men kan deze eigenschappen zeer gemakkelijk ophelderen door een eenvoudigen toestel, bestaande uit een houten liniaal, waarop verdeelingen zijn aangebragt, en langs welk men een lichtgevend voorwerp, eene lens en een scherm kan verschuiven. Door deze drie op de boven aangewezene afstanden te plaatsen, zal men de verschillende verschijnselen zeer gemakkelijk kunnen waarnemen.

Vergelijkt men verschillende lenzen onderling, dan kan men uit deze eigenschappen nog het volgende afleiden. Bij eene lens van korten brandpunts-afstand liggen de beelden van verwijderde voorwerpen digter bij de lens, dan

zij eene lens van grooten brandpunts-afstand. Bevindt zich echter het voorwerp digter bij, dan zal het beeld des te grooter wezen, naarmate de brandpunts-afstand geringer is.

Bevindt zich het voorwerp tusschen de lens en het hoofdbrandpunt, dan kan er geen beeld ontstaan, zoo als blijkt uit fig. 392, waar de van A uitgaande lichtstralen ABCD en AEGH divergeren: worden zij aan de andere zijde der lens verlengd, dan ontmoeten zij elkander en de neven-as IM in een punt P; hetzelfde geldt voor de van N uitgaande lichtstralen, welke, verlengd zijnde, elkander in Q zullen snijden. Er wordt dus in PQ een virtueel beeld gevormd, dat grooter en niet omgekeerd is.

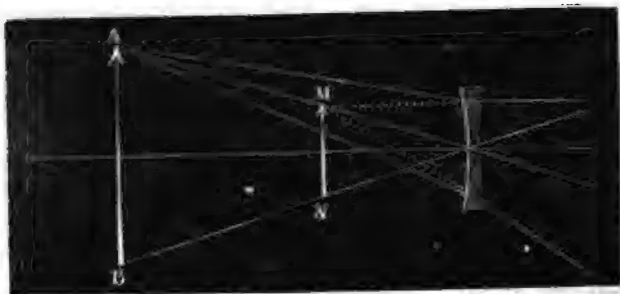
Fig. 392.



Houdt men een voorwerp achter eene lens, dan zal men dus eveneens het achter een vergroot beeld zien; dit is eene eigenschap, die wij bij ieder bekend mogen onderstellen, en welke oorzaak is, dat men aan zoodanige lens den naam van vergrootglas geeft.

De door twee holle bolvormige oppervlakten begrensde lenzen geven in 't geheel geen werkelijke beelden, zoo als aanstonds blijkt uit hetgeen hiervóór over de brandpunten bij die lenzen is gezegd. De van A (Fig. 393)

Fig. 393.



uitgaande stralen divergeren aan gene zijde van de lens nog meer; verlengd zijnde, ontmoeten zij elkander in M, waar het schijnbaar brandpunt gelegen is;

met de van B en andere punten van het voorwerp uitgaande lichtstralen is hetzelfde het geval, zoodat er in MN een schijnbaar beeld gevormd wordt, overeind staande, doch kleiner dan het voorwerp. Plaatst men dus achter eene lens, zooals de hier afgebeelde, een voorwerp, dan zal men het door die lens verkleind waarnemen.

In alle voorgaande gevallen hebben wij ondersteld, dat het getal graden, of zooals men het noemt, de opening van de lens, niet meer dan 10° bedraagt; alleen dan mag men onderstellen, dat de gebrokene stralen weder zamenkomen in een zelfde punt der neven-as. Is dus de opening grooter, dan zullen de beelden niet zuiver kunnen zijn, daar de stralen, die bij zoodanige lens verder van het optisch middenpunt verwijderd zijn, zich digter bij de lens vereenigen dan die, welke meer door het midden der lens zijn heengegaan. Deze afwijking noemt men de afwijking of aberratie wegens bolvormigheid, even als bij de spiegels; om ze echter van elkander te onderscheiden voegt men achter deze uitdrukking voor de spiegels de woorden *door terugkaatsing*, terwijl men die bij de lenzen spherische aberratie *door straalbreking* noemt.

Uit het voorgaande volgt, dat men de mindere juistheid der beelden, door zoodanige lenzen ontstaande, gedeeltelijk kan uit den weg ruimen, door de lichtstralen alleen door het middelste gedeelte der lens te doen gaan. Te dien einde sluit men de andere stralen af door voor de lens een scherm met ronde opening, doorgaans *diaphragma* genoemd, te plaatsen.

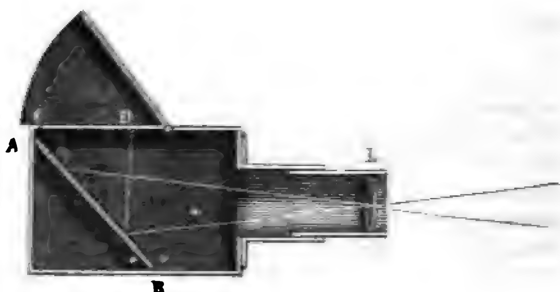
401. **Camera obscura, of donkere kamer.** — In de leer van het licht worden eenige werktuigen gebruikt, wier werking alleen of hoofdzakelijk berust op de hier vermelde eigenschappen der door lenzen gevormde beelden. Het eerst komt als zoodanig in aanmerking de donkere kamer of *camera obscura*.

Wij hebben hiervóór (373) reeds de opmerking gemaakt, dat wanneer door eene naauwe opening in den wand van een donker vertrek lichtstralen binnen treden, aan den tegenoverstaanden wand een omgekeerd beeld van de daarbuiten geplaatste voorwerpen wordt waargenomen. Porta, die in de tweede helft der 16de eeuw deze opmerking maakte, bevond tevens, dan wanneer men in de opening eene convexe lens plaatst, de zuiverheid en naauwkeurigheid van het beeld veel grooter is, wanneer het ten minste op een zich ter juister plaatse bevindend scherm wordt opgevangen. Hetgeen hiervóór over de door zoodanige lens gevormde beelden is gezegd, geeft terstond eene verklaring van het verschijnsel.

Dat het beeld omgekeerd wordt is voor de waarneming lastig; men heeft verschillende middelen bedacht om hierin te voorzien; op de eenvoudigste

wijze wordt het in zijn natuurlijken stand hersteld door de lichtstralen, welke door de lens gebroken zijn, op een schuins geplaatsten spiegel te doen terugkaatsen, zooals in fig. 394 is voorgesteld. Zoodanigen toestel noemt men eene *camera obscura* of donkere kamer. Bij L bevindt zich de lens, AB is de spiegel, waardoor de stralen worden teruggekaatst tegen een mat glas CD, dat zich

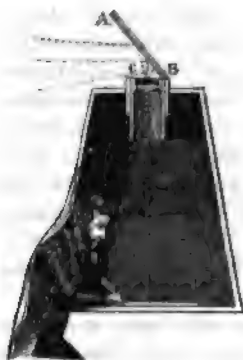
Fig. 394.



in den bovenwand van den toestel bevindt. Op dit mat glas wordt dus het beeld opgevangen. De toestel is zoodanig ingerigt, dat men hem kan uit- en inschuiven. Dit dient om hem zoo te kunnen stellen, dat het beeld juist zuiver op het glas gevormd wordt, hetgeen afhankelijk is van den afstand van het voorwerp.

Somtijds geeft men aan de donkere kamer de inrigting, die in fig. 395 is voorgesteld. Zij bestaat alsdan uit eene meer of minder hooge kast, in wier bovenwand zich de lens C bevindt. Daarbuiten is een spiegel AB geplaatst, ten einde de lichtstralen van de daarbuiten geplaatste voorwerpen naar de lens te kunnen terugkaatsen, door welke zij worden gebroken om op de benedenste oppervlakte een zuiver beeld te vormen. Legt men daar een vel papier, dan kan men, door de omtrekken van het beeld na te trekken, gemakkelijk eene naauwkeurige teekening van de voorwerpen vervaardigen.

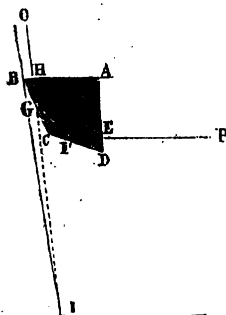
Fig. 395.



402. **Camera lucida of lichte kamer.** — Na van de camera obscura gesproken te hebben

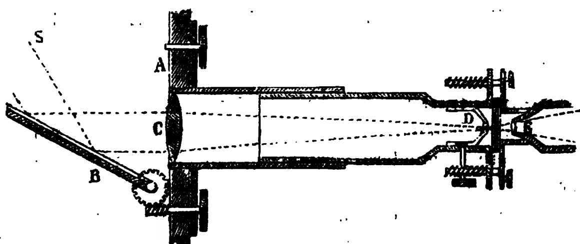
als middel om eene naauwkeurige teekening van eenig voorwerp te vervaardigen, moeten wij nog gewag maken van een met hetzelfde doel zamengesteld werktuig, dat men *camera lucida* of lichte kamer noemt; de overeenkomst in naam berust echter alleen op de gelijkheid van het doel, doch niet op eenige overeenkomst in zamenstelling, zooals uit de beschrijving van dezen toestel zal blijken. Hij bestaat uit een glazen prisma, waarvan ABCD (Fig. 396) eene doorsnede voorstelt. Een van P uitgaande lichtstraal wordt eerst op het vlak CD en daarna op CB teruggekaatst, zoodat hij langs den weg PEFGHO in het oog O komt; men zal het beeld van het voorwerp dus ergens in I zien, en zal, wanneer men daar een blad papier legt, dat beeld kunnen nateekenen, indien men ten minste het oog digt bij den kant B geplaatst heeft, zoodat men langs het prisma heen het papier kan zien. Onder deze gedaante heeft Wollaston (1809) het eerst eene camera lucida vervaardigd; later is deze toestel door Amici en anderen nog eenigzins gewijzigd en voor het gebruik gemakkelijker gemaakt.

Fig. 396.



403. **Zon-mikroskoop en tooverlantaarn.** — De zon-mikroskoop dient om tegen een scherm in een donker vertrek een zeer vergroot beeld van het een of ander klein voorwerp te geven. Fig. 397 stelt eene doorsnede van dezen toestel voor. Hij bestaat uit een koperen koker, die bij

Fig. 397.



A in het blind van een donker vertrek wordt bevestigd; B is een spiegel,

die zich buiten bevindt en zoodanig kan gesteld worden, dat hij de zonnestralen juist terugkaatst in de rigting van de as van den koker. Bij C bevindt zich eene dubbel-bolvormige lens, waardoor de zonnestralen gebroken worden, zoodat zij eenigzins convergeren. Deze lichtstralen vallen vervolgens op eene tweede dubbel-bolvormige lens D, welke kan verplaatst worden, zoodat daar, waar zich het voorwerp bevindt, een klein maar zeer duidelijk beeld van de zon gevormd wordt. Deze inrigting dient hoofdzakelijk om het voorwerp sterk te verlichten. De daarvan uitgaande stralen vallen vervolgens op eene lens met zeer korten brandpunts-afstand E, welke zoo is geplaatst, dat het voorwerp een weinig verder verwijderd is dan het hoofdbrandpunt. Men zal dus op een aanzienlijken afstand een omgekeerd beeld verkrijgen van dat voorwerp, dat men op een wit scherm of op eene witte muur opvangt.

Men kan met den zon-mikroskoop aanzienlijke vergrootingen van kleine voorwerpen vertoonen; dit voordeel is er aan verbonden, dat men het beeld te gelijk aan een groot aantal personen kan doen zien. Voor naauwkeurige onderzoekingen is hij echter minder geschikt, daar de omtrekken van de beelden zelden zeer zuiver zijn.

In plaats van de zon als lichtbron te gebruiken kan men ook van het hiervóór beschreven Drummond's licht gebruik maken. De toestel moet dan uit den aard der zaak eenige wijzigingen ondergaan; de werking der lenzen is echter bij deze inrigting, die men doorgaans gas-mikroskoop noemt, dezelfde als bij den zon-mikroskoop.

De tooverlantaarn, die dikwijls als speelgoed gebruikt wordt, berust geheel op hetzelfde beginsel; de vergrooting is minder aanzienlijk, en men telt er doorgaans slechts twee lenzen aan in plaats van drie.

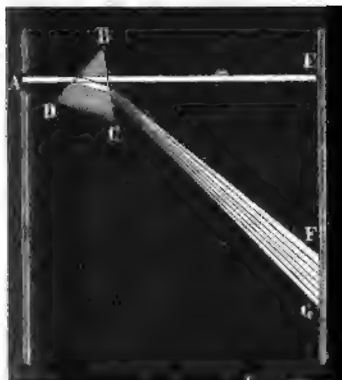
D. ONTLEDING VAN HET LICHT. KLEUREN.

404. **Zonnespectrum of kleurenbeeld.** — Wanneer wij de verschillende voorwerpen rondom ons beschouwen, dan bemerken wij dat zij niet alleen door meerdere of mindere verlichting van elkander onderscheiden zijn, maar voornamelijk ook door hetgeen wij *kleur* noemen. Wij moeten nu de eigenschappen van het licht, die daarmede in verband staan, leeren kennen.

Het licht van de zon is niet enkelvoudig, maar kan ontleed worden. Men kan dit aantoonen door in een donker vertrek door eene naauwe opening A (Fig. 398) op een prisma BCD een lichtbundel te doen vallen; deze zal dan, zoo als

wij gezien hebben, gebroken worden en een beeld geven bij FG in plaats van bij E, waar het zoude gevormd worden zoo er geene straalbreking was. Maar de verplaatsing van het beeld is niet het eenige wat hier wordt waargenomen; nog twee andere verschijnselen trekken onze aandacht; in de eerste plaats, dat het beeld niet zoo als gewoonlijk rond is, maar langwerpig; ten tweede, dat het gekleurd is. Herhaalt men de proef met een ander prisma, hetzij van glas, hetzij van de eene of andere vloeistof, dan neemt men hetzelfde waar; alleen kan in dat geval het beeld iets minder langwerpig zijn en op eene andere plaats gevormd worden; de kleuren volgen echter elkander in dezelfde orde op. Wegens haren zachten overgang in elkander is het moeijelijk om aan te wijzen, waar de eene kleur ophoudt en de andere begint. Nogtans kan men gemakkelijk de volgende hoofdkleuren onderscheiden: *rood*, *oranje*, *geel*, *groen*, *blaauw*, *indigo* en *paars* of *violet*. Deze kleuren worden de *enkelvoudige* kleuren genoemd; het beeld, dat uit deze kleuren is zamengesteld, heet het *kleurenbeeld* of *zonnespectrum*. Het verschijnsel zelf wordt de *dispersie*, *verspreiding* of *ontleding* van het licht genoemd.

Fig. 398.



De oorzaak van dit verschijnsel, welke het eerst door Newton is aangewezen, is de volgende. Het witte licht der zon is niet enkelvoudig, maar zamengesteld; het bestaat uit lichtstralen van verschillende breekbaarheid. De roode lichtstralen zijn het minst breekbaar, daarom wijken zij minder van den regten weg af dan de andere; daarop volgen de oranjelichtstralen, en zoo verder tot de violette, welke het meest breekbaar zijn, en daarom ook het meest afwijken. Men kan dit ook nog op de volgende wijze duidelijk maken. Men neemt twee strookjes papier, het eene rood, het andere violet, beide zooveel mogelijk met die kleuren in het spectrum overeenkomende, en legt ze naast elkander op de tafel. Beschouwt men ze dan door een prisma, dan ziet men ze niet meer naast elkander, maar bevindt dat de afwijking ongelijk is, hetgeen doet zien, dat de lichtstralen van het eene, en wel die van het roode, minder gebroken zijn. Hierbij valt echter nog op te merken, dat ook de lichtstralen eener zelfde kleur niet alle even breekbaar zijn; de breekbaarheid neemt toe van het uiterste rood af tot het

uiterste violet toe; dientengevolge zijn bijv. de groene lichtstralen, die aan het blaauw grenzen, breekbaarder dan die, welke het digtst bij het geel gelegen zijn. Dit blijkt nog duidelijker, wanneer men een reeds door een prisma gebrokene lichtbundel andermaal laat gaan door een tweede prisma, dat digt daarachter is geplaatst, doch zoodanig, dat de ribben van het eene een regten hoek maken met die van het andere. Loopen de ribben van het eerste prisma horizontaal en die van het tweede vertikaal, dan zal het gevormde spectrum, in plaats van overeind te staan, een schuinschen stand aannemen, en wel in diervoege, dat het violet het meest afwijkt. Hieruit blijkt dus duidelijk, dat de breekbaarheid toeneemt, naarmate men digter tot het violet komt.

Wij hebben zoo even gezegd, dat de kleuren, die wij in het zonnespectrum waarnemen, enkelvoudig zijn; dit kan ook gemakkelijk door eene proef worden opgehelderd. Laat men een van de door het prisma gebrokene lichtstralen andermaal door een tweede prisma gaan, dan wordt hij wel gebroken, maar de kleur blijft dezelfde; ontleding heeft hier dus niet weder plaats, en men mag daaruit de gevolgtrekking maken, dat de lichtstralen van het spectrum enkelvoudige lichtstralen zijn.

Verschillende stoffen hebben, zooals hiervóór reeds is opgemerkt, verschillende brekings-exponenten; maar ook de dispersie, dat is het vermogen om bij de breking de verschillend gekleurde lichtstralen van elkander te doen afwijken, is niet bij alle gelijk, zooals blijkt uit de ongelijke lengte van het spectrum, naar gelang het door de eene of de andere stof gevormd is. Men zal inzien, dat de dispersie gemeten kan worden door het verschil van de brekings-exponenten van de uiterste roode en de uiterste violette stralen. Bij flintglas is het verschil 0,0433, bij crownglas 0,0207, bij water 0,0132, bij alcohol 0,011, bij zwavelether 0,012, bij zwavelkoolstof 0,0308, bij olijfolie 0,018. Van alle soorten van glas heeft flintglas de grootste dispersie.

405. **Zamenstelling van de kleuren van het spectrum tot wit licht.** — Even als men door ontleding van wit licht verschillend gekleurde lichtstralen verkrijgt, zoo kan men ook door zamenstelling van die gekleurde lichtstralen wederom wit licht verkrijgen. Door verschillende proeven kan men deze eigenschap ophelderen.

Plaatst men vlak achter het prisma, waardoor het licht gebroken en ontleed is, een tweede prisma van dezelfde stof en van denzelfden brekingshoek, dan zal niet alleen de afwijking weder verdwijnen, maar de lichtbundel treedt ongekleurd uit het tweede prisma te voorschijn. Laat men de door het eerste

streep op een donkeren grond, dan zijn de kleuren juist omgekeerd, dat is, prisma gebrokene en gekleurde lichtstralen op eene groote dubbel-bolvormige lens vallen, dan kan men deze zoodanig plaatsen, dat die stralen weder in een punt zamenkomen. In dat punt wordt dan geen gekleurd maar wit licht waargenomen. Nog kan men dit verschijnsel duidelijk maken door de gekleurde lichtstralen te laten vallen op zeven verschillende vlakke spiegeltjes, en die zoodanig te plaatsen, dat de teruggekaatste lichtstralen op een zelfde scherm zamenkomen. Op dat scherm zal men dan een wit beeld waarnemen.

Hoewel het zeer moeijelijk is de enkelvoudige kleuren van het spectrum kunstmatig na te bootsen, zoo kan men toch bij benadering kleuren vervaardigen, die dezelfde eigenschap hebben, dat wil zeggen, die bij zamenstelling wit licht geven. Men moet dan bewerken, dat het oog te gelijk den indruk van al die kleuren krijgt. Newton heeft dit het eerst op de volgende wijze bewerkstelligd. Eene houten of bordpapieren schijf wordt verdeeld in zeven cirkelsectoren, wier grootte overeenkomt met de verschillende uitgebreidheid der hoofdkleuren in het zonnespectrum; men beplakt elk dier sectoren dan met gekleurd papier, dat zoo nabij mogelijk aan de kleur van het spectrum komt. Wordt die schijf zeer schielijk in de rondte gedraaid meteen toestel, zooals in fig. 49 is afgebeeld, dan schijnt het alsof zij wit is. De oorzaak daarvan is, dat tengevolge van het schielijk omdraaijen de indruk van de verschillende gekleurde sectoren nagenoeg gelijktijdig door het oog wordt opgenomen.

406. **Gekleurde randen aan de ligchamen, die men door een prisma ziet.** — Wanneer wij de voorwerpen, die ons omringen, door een prisma beschouwen, dan nemen wij ook daaraan dezelfde kleuren waar, die zich in het zonnespectrum vertoonen. De bijzonderheden van dit verschijnsel zijn echter eenigzins afhankelijk van den meer of min verlichten toestand alsook van de kleur dier voorwerpen.

Beschouwt men door een prisma eene lichte of witte streep op een donkeren grond, die evenwijdig loopt met de evenwijdige ribben van het prisma, dan ziet men eene gekleurde streep, waarbij de kleuren elkander even als bij het door de zon gevormde spectrum opvolgen. Heeft men eene breede strook wit papier genomen, dan zijn alleen de randen gekleurd, en wel de eene rand met violet en de digt daarbij liggende kleuren van het spectrum, de andere met rood en de daarbij behoorende kleuren. Dat de ruimte tusschen die twee randen wit blijft, moet daaraan worden toegeschreven, dat de gekleurde beelden van de binnenste deelen van de streep elkander bedekken, en dat daardoör weder wit licht wordt zamengesteld. Beschouwt men eene zwarte

wanneer men bij de witte streep bovenaan rood en onderaan violet waarneemt, dan zal men bij de zwarte streep bovenaan violet en onderaan rood bemerken. In dit geval is het echter niet aan den zwarten rand, dat die ontleding van het licht plaats heeft, maar aan den witten rand van den witten grond, waarop de zwarte streep geteekend is.

Ziet men door een prisma naar eene gekleurde streep of strook, dan neemt men hetzelfde waar; alleen kan er dan ten gevolge van die kleur eenige wijziging in de kleuren van het spectrum plaats hebben. Bij eene breede strook behoudt het midden zijne kleur.

407. **Strepen in het spectrum.** — Wanneer men door een zeer zuiver prisma van flintglas op een afstand van ongeveer drie ellen eene naauwe spleet beschouwt, die men in den wand van een donker vertrek gemaakt heeft, en waarop het zonnelicht valt, dan zal men in het aldus gevormde spectrum donkere strepen bemerken, die evenwijdig loopen met de ribben van het prisma. Nog duidelijker vallen zij in het oog, wanneer men ze met een kijkertje beschouwt; men kan er dan tot 600 tellen. Eenige onder die strepen vallen meer in 't bijzonder in het oog, en worden naar Frauenhofer, die ze het eerst (1817) beschreef, de *Frauenhofer'sche strepen* genoemd. Fig. 399 wijst aan waar zich die strepen bevinden, alsmede de letters waarmede men ze gewoonlijk aanduidt; sommige dier strepen zijn, zooals uit de figuur blijkt, dubbel of veelvoudig. Voor eene zelfde lichtbron, of zelfs voor eene zelfde soort van licht, blijven de strepen op dezelfde plaats; dit is

Fig. 399.



bijv. het geval met het zonlicht, maanlicht, ja zelfs met het gewone licht, dat door de wolken wordt teruggekaatst. In het spectrum daarentegen van het licht van eene vaste ster zijn de strepen eenigzins anders. Een spectrum gevormd door het licht van eene vlam of van eene electrische vonk bevat geene donkere maar lichte strepen. Zeer duidelijk kan men die waarnemen, vooral die in het groen en in het geel, wanneer men de vonk van een inductie-toestel van Ruhmkorff door een kijkertje en een prisma beschouwt. Despretz, van der Willigen en anderen hebben opgemerkt, dat de plaats en de lichtsterkte dier strepen verschilt naar gelang van de metalen, tusschen welke de inductie-vonk overspringt.

De oorzaak der donkere strepen in het spectrum is waarschijnlijk gelegen in de absorptie van sommige lichtstralen door de in den dampkring aanwezige dampen. Van de lichte strepen in het spectrum van eene vlam of van de electrische vonk heeft men tot dusverre de oorzaak nog niet kunnen aanwijzen.

408. **Leer der kleuren.** — Wij hebben in de voorgaande bladzijden de gekleurde lichtstralen beschreven, zooals zij door de breking en dispersie van het witte licht ontstaan. Maar ook zonder dat nemen wij bij de ligchamen, die ons omringen, eene groote afwisseling van kleuren waar; wij zullen thans nagaan, hoe dat verschijnsel verklaard is door Newton, wiens leer der kleuren thans nog algemeen voor de juiste wordt gehouden.

Wanneer wij een ligchaam zien, geschiedt dit alleen doordat de lichtstralen, van de eene of andere lichtbron daarop vallende, naar ons oog teruggekaatst worden. Was die terugkaatsing volledig, dan zouden in ons oog de stralen van de lichtbron onveranderd, dat is wit, teruggekaatst worden, en alle voorwerpen zouden ons wit toeschijnen. Dit heeft echter niet plaats; een gedeelte der lichtstralen wordt geabsorbeerd, een ander gedeelte teruggekaatst, en het hangt alleen van den aard dier teruggekaatste stralen af, hoe het ligchaam zich aan ons oog voordoet. Een zwart ligchaam absorbeert alle lichtstralen, een wit kaatst ze alle terug, of beter gezegd, de onderlinge verhouding der teruggekaatste lichtstralen is dezelfde als die in het witte licht; een gedeelte wordt er altoos geabsorbeerd. Alle andere ligchamen kaatsen de gekleurde lichtstralen, waaruit het witte licht is zamengesteld, in zeer verschillende verhoudingen terug, en die verbindingen geven aanleiding tot het oneindig aantal schakeringen, die men overal waarneemt. De kleur van een voorwerp behoort dus, om zoo te zeggen, niet aan dat voorwerp zelf, maar is alleen een gevolg van de eigenschap der stofdeeltjes, die zich aan de oppervlakte bevinden, om het daarop invallend licht te ontleden en van de verschillende lichtstralen, waaruit dat is zamengesteld, slechts enkele terug te kaatsen. Men kan deze verklaring door verschillende proeven ophelderen, waarvan wij er eenige zullen vermelden.

Laat men het zonnespectrum vallen op eene gekleurde, bijv. op eene roode oppervlakte, dan is dat gedeelte, waar de roode stralen van het spectrum vallen, zeer helder, terwijl daarentegen de andere gedeelten van het spectrum veel minder zigtbaar zijn; dit komt omdat alle gekleurde lichtstralen, behalve de roode, door de roode oppervlakte geabsorbeerd worden. Laat men op eene roode oppervlakte een gekleurde doch niet roode lichtstraal vallen, dan vertoont die oppervlakte

zich niet alleen minder helder, maar ook in eene andere kleur. Neemt men bijv. een gouden en een zilveren muntstuk, en verlicht men die in het brandpunt eener lens, waardoor men een lichtbundel laat gaan, waarvan men de geele stralen heeft tegengehouden, dan schijnen goud en zilver dezelfde kleur te hebben. Gekleurde ligchamen nemen verschillende kleuren aan, wanneer zij door verschillende soorten van licht verlicht worden. Het is een verschijnsel, dat ieder heeft opgemerkt, dat een voorwerp, hetwelk bij dag groen is, des avonds bij lamplicht zich blaauw vertoont; dit komt omdat in het spectrum, door ontleding van het lamplicht ontstaande, minder geel aanwezig is. De weinige geele stralen worden dus grootendeels geabsorbeerd, en het groene voorwerp vertoont zich minder geel gekleurd, dus blaauwachtig. Om dezelfde reden is een bij zonnelicht lichtgeel gekleurd voorwerp bij lamplicht wit. Nog duidelijker maakt men dit, wanneer men alcohol vermengt met $\frac{1}{4}$ volume van eene sterke oplossing van keukenzout in water; laat men daarin eene pit branden, dan verkrijgt men eene vlam, die nagenoeg zuiver geel gekleurd is, en waaraan men, als men ze door een prisma beschouwt, nagenoeg geen gekleurde randen waarneemt. Plaatst men zoodanige lamp in een donker vertrek nabij een zwart papier, waarop men strooken geplakt heeft van de onderscheidene kleuren van het spectrum, dan ziet men alleen de geele, de oranje en de roode strooken; de andere absorberen al het geele licht, en kaatsen dus geen licht terug. Het gelaat heeft in zulk licht eene lijkachtige kleur, daar de roode lichtstralen, welke het bij de gewone verlichting terugkaatst, in dat geele licht niet aanwezig zijn.

Men kan ook andere gekleurde vlammen maken; lost men een kaliumzout in alcohol op, dan is de vlam paars; strontiumzouten geven eene roode vlam, barytzouten, alsook boriumzuur eene groene, kobaltzouten eene blaauwe vlam. Deze kleuren zijn echter minder zuiver enkelvoudig dan die van de sodiumzouten.

Verschillende oorzaken kunnen de kleur der ligchamen veranderen; warmte doet dit in de eerste plaats. Ook verandering in den moleculairen toestand kan daarop invloed uitoefenen; verscheidene metalen doen zich zwart voor, als zij tot een zeer fijn poeder gemaakt zijn. Ruw marmer heeft eene geheel andere kleur, dan wanneer het gepolijst is.

409. **Zamengestelde kleuren.** — De kleuren, welke men aan de meeste ligchamen waarneemt, zijn geen enkelvoudige kleuren, zooals door eene vergelijking met de kleuren van het spectrum aanstonds blijkt. Om de kleur duidelijk te erkennen en na te gaan, uit welke zij is zamengesteld, be-

hoeft men slechts een smal strookje van dat ligchaam door een prisma te beschouwen, en in het dan gevormde spectrum de door ontleding dier zamengestelde kleur gevormde enkelvoudige kleuren waar te nemen.

Niet altijd zijn de zeven kleuren van het spectrum noodig om wit licht te verkrijgen; ook door combinatie van slechts twee dier kleuren kan wit licht ontstaan. De kleuren, welke die eigenschap hebben, noemt men *complementaire* of *aanvullings-kleuren.* Welke de complementaire kleuren zijn kan men bepalen, wanneer men in een spectrum eene der kleuren tegenhoudt, of door middel van een prisma eene andere rigting doet aannemen. Vereenigt men de overgeblevene kleuren dan door middel van eene lens, dan zal de aldus verkregene kleur de aanvullingskleur zijn van die, welke men heeft tegengehouden. Houdt men bijv. rood en oranje tegen, dan verkrijgt het door de lens gevormde beeld eene groene kleur. Rood en groen zijn dus complementaire kleuren. Hetzelfde geldt voor oranje en blaauw, voor geel en violet. Men kan de eigenschap der complementaire kleuren ook aantoonen door de volgende eenvoudige proef; men laat namelijk door middel van twee tooverlantaarns op een wit scherm twee complementair gekleurde beelden vallen; waar deze elkander bedekken, zal het beeld wit zijn.

Door vereeniging van de onderscheidene kleuren van het spectrum ontstaan somtijds kleuren, die nagenoeg met andere kleuren van het spectrum overeenkomen, somtijds ook geheel verschillende. Geel en blaauw geven groen, maar dit groen is minder helder, dan dat van het spectrum. Geel en rood geven oranje; paars en rood kunnen niet door combinatie van andere kleuren van het spectrum verkregen worden. Rood en blaauwachtig groen van het spectrum geven geel; brengt men echter rood zamen met de blaauwachtig groene kleur, welke men verkrijgt door combinatie van groen en indigo, dan is de zamengestelde kleur wit; dergelijke onregelmatigheden neemt men meer waar bij de onderlinge vereeniging der kleuren.

De kleuren van het spectrum zelf, hoezeer men door combinatie van andere kleuren er kan zamenstellen, die er nagenoeg mede overeenkomen, zijn toch enkelvoudige kleuren, die niet kunnen ontleed worden. Hoewel blaauw en geel te zamen groen geven, kan het groen van het spectrum niet in blaauw en geel ontleed worden. Sommigen zijn van meening geweest, dat men met drie kleuren van het spectrum, namelijk rood, geel en blaauw alle andere kleuren van het spectrum kan zamenstellen; proefnemingen van Helmholtz hebben echter aangetoond, dat zulks onmogelijk is.

410. Absorptie van licht door doorschijnende middenstof-

fen. — Wij hebben op de voorgaande bladzijden reeds meermalen van de eigenschap van sommige doorschijnende ligchamen gewaagd, dat zij gekleurd licht doorlaten. Ieder weet, dat er stoffen zijn welke het licht, wat de kleur aangaat, geheel onveranderd doorlaten, zoo als water, lucht en eenige andere gassen. Het licht verliest daardoor echter altijd een gedeelte zijner sterkte: is de laag dik, dan kan dit verlies aanzienlijk zijn, en somtijds kan dit verlies ook gepaard gaan met eene ontleding van het witte licht, welke men bij dunnere lagen niet bemerkt. Zoo kan bijv. een lichtstraal, die door eene dikke glaslaag gegaan is, groenachtig schijnen; licht, dat door eene zeer dikke luchtlaag is gegaan, is blaauw gekleurd. Gaat een witte lichtstraal door een gekleurd voorwerp, dan heeft er altijd ontleding en gedeeltelijke absorptie of opslorping van licht plaats. Laat men in een donker vertrek een zonnestraal vallen op een glas, dat door koperoxyd rood gekleurd is, dan worden alle stralen geabsorbeerd, behalve alleen de roode, die doorgelaten worden. Laat men een witte lichtstraal vallen op eene oplossing van zwavelzuur koperoxyd-ammoniak, die men in een glazen bakje met evenwijdige wanden geschonken heeft, dan worden alle stralen, behalve de blaauwe, geabsorbeerd. Gekleurde lichtstralen op zoodanig gekleurd doorschijnend ligchaam invallende, worden alleen dan doorgelaten, als de kleur dezelfde is; beschouwt men bijv. een door een prisma op een wit scherm gevormd spectrum door een rood glas, dan ziet men alleen het roode gedeelte van het spectrum; alle andere gekleurde lichtstralen worden door het roode glas geabsorbeerd en komen niet tot het oog. Is het glas, waardoor men ziet, niet enkelvoudig gekleurd, dan ziet men twee of meer kleuren van het prisma, maar nimmer alle, daar er altijd eenige geabsorbeerd worden, namelijk die, welke niet in de kleur van het glas aanwezig zijn.

Plaatst men verschillende glazen van dezelfde kleur achter elkander, dan wordt slechts zeer weinig licht geabsorbeerd; de kleur verandert niet, maar de lichtsterkte neemt een weinig af. Plaatst men echter ongelijk gekleurde glazen achter elkander, dan kan het volgende glas stralen absorberen, welke door het eerste waren doorgelaten. Is bijv. een lichtstraal eerst door een rood glas gegaan, dan zijn alle lichtstralen, behalve de roode, geabsorbeerd; laat men het doorgelatene roode licht nu op een groen glas vallen, dat de eigenschap heeft van alle lichtstralen, behalve de groene, te absorberen, dan wordt er volstrekt geen licht doorgelaten. De twee doorschijnende glazen vormen dus te zamen een ondoorschijnend ligchaam.

De dikte van het doorschijnende ligchaam kan in sommige gevallen van invloed zijn op de kleur der doorgelatene lichtstralen. Een lichtstraal door

eene dunne laag eener oplossing van saffraan doorgelaten is geel; is de laag dikker, dan laat zij rood licht door. Eene ongeveer 12 duim dikke laag van eene oplossing van zwavelzuur koperoxyd-ammoniak laat geen blaauw, maar nagenoeg enkelvoudig violet licht door. Het door kobaltblaauw gekleurde glas laat, wanneer men eene dikkere laag neemt, lichtstralen door die steeds eene meer roodachtige kleur krijgen; bij genoegzame dikte zijn de lichtstralen bepaald rood.

Sommige ligchamen worden doorschijnend, wanneer zij met de eene of andere vloeistof doortrokken zijn; dit is onder anderen het geval met papier, dat met olie doortrokken is. Dit moet daaraan worden toegeschreven, dat het brekingsvermogen van olie aanzienlijker is dan dat van de lucht, die zich anders tusschen de porien bevindt. De papierdeeltjes worden daardoor ten opzigte van het licht meer gelijksoortig. Sommige steenen, zooals de *hydrophaan*, hebben de eigenschap van in den gewonen toestand ondoorschijnend te zijn, maar doorschijnend te worden als men ze in water legt. Zoo moet ook de ondoorschijnendheid van de sneeuw en van gestampt glas worden toegeschreven aan de lucht, die zich tusschen de ijsdeeltjes of tusschen de glasdeeltjes bevindt.

411. **Fluorescentie.** — Sommige ligchamen vertoonen zeer eigenaardige en hoogst opmerkingswaardige lichtverschijnselen, welke het eerst zorgvuldig door Stokes (1852) zijn waargenomen, beschreven en door den naam van *fluorescentie* aangeduid.

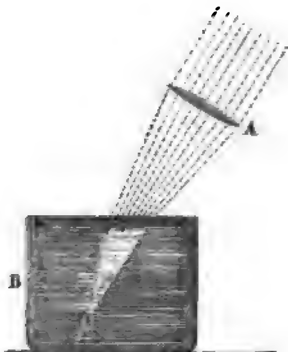
Lost men een weinig zwavelzure quinine in ongeveer 150 deelen water op, waarbij men eenige druppels zwavelzuur gevoegd heeft, dan blijft de vloeistof bij doorgaand licht volkomen kleurloos. Plaatst men echter den glazen beker met de vloeistof zoodanig, dat men ze van boven bezien kan, terwijl het zonnelicht of helder daglicht van voren er op schijnt, dan neemt men een lichtblaauwen weêrschijn waar.

Iets dergelijks bemerkt men bij een aftreksel van den bast van den wilden kastanjeboom; de lichtbruine vloeistof heeft onder dezelfde omstandigheden eveneens een blaauwen weêrschijn. Nog treffender is het verschijnsel bij eene oplossing in ether of in alcohol van het chlorophyl of de groene kleurstof der bladeren, welke men gemakkelijk kan vervaardigen door bladeren van den gewonen brandnetel met ether of alcohol zonder verwarming uit te trekken. Aan de oppervlakte van zoodanige oplossing neemt men, als zij aan het zonnelicht is blootgesteld, een licht bloedrooden weêrschijn waar. Ook bij sommige vaste ligchamen bemerkt men iets dergelijks, onder anderen bij glas

dat door uranium groen gekleurd is, alsmede bij sommige soorten van vloeispath (fluor), aan welke laatste stof dit verschijnsel zijn naam ontleend heeft.

Duidelijker nog kan men de fluorescentie maken, wanneer men op de wijze, voorgesteld in fig. 400, de zonnestralen door eene bolle lens A doet convergeren, in diervoege, dat het vereenigingspunt C dier stralen onder de oppervlakte der vloeistof in het glazen bakje B valt. Men neemt dan onder en aan de oppervlakte der vloeistof een prachtigen lichtkegel waar, die bij zwavelzure quinine hemelsblaauw, bij eene oplossing van bladgroen fraai rood, bij het aftreksel van kastanjebast blaauw, bij eene oplossing van kurkuma groen, bij eene lakmoesoplossing vaal oranjekleurig is.

Fig. 400.



De verschijnselen, welke deze fluorescerende lichtkegel in gekleurd licht vertoont, zijn zeer uiteenloopend. Opmerkelijk is het, dat het een merkbaar onderscheid uitmaakt, of het licht, alvorens door de lens te gaan, eerst door een of ander daarbij geplaatst ligchaam gekleurd wordt, dan wel of men den lichtkegel door een zoodanig gekleurd ligchaam beschouwt. Zoo zal bijv. de blaauwe lichtkegel in zwavelzure quinine niet verdwijnen, wanneer men hem door eene oplossing van chromiumzure kali beschouwt, maar wel wanneer men die oplossing voor de lens plaatst. Daarentegen blijven de verschijnselen der fluorescentie goed zigtbaar in de oplossing van bladgroen, wanneer men eene blaauwe oplossing van zwavelzuur koperoxyd-ammoniak voor de lens plaatst, terwijl zij ophouden als men den lichtkegel door zoodanige oplossing aanschouwt. Bij het uraniumglas wordt hetzelfde waargenomen; gebruikt men daarbij eene groene oplossing van chloorkoper om het licht te kleuren, dan neemt men juist het omgekeerde waar. Bij eene oplossing van kurkuma verdwijnt de fluorescentie, wanneer een rood glas voor de lens geplaatst wordt, doch niet als men het voor het oog houdt. Neemt men in plaats van het roode glas eene blaauwe oplossing van zwavelzuur koperoxyd-ammoniak, dan heeft juist het tegenovergestelde plaats. In dit opzigt verschilt dus de kleur der fluorescerende ligchamen van die der gewone ligchamen, bij welke het onverschillig is, of men gekleurd licht er op laat vallen en het met het bloote oog beschouwt, of wel het aan het witte licht blootstelt en het gekleurd glas voor

de oogen houdt. De fluorescerende ligchamen hebben, blijkens het voorgaande, de eigenschap van de kleur der daarop vallende lichtstralen te veranderen, daar het daardoor naar verschillende kanten teruggekaatst of verstrooid licht doorgaans eene andere kleur heeft dan het daarop gevallene. Zoo zal bijv. het door zwavelzuur koperoxyd-ammoniak paarsachtig blaauw gekleurde licht in staat zijn in eene oplossing van bladgroen een rooden lichtkegel te doen ontstaan, welk rood licht echter door eene voor het oog geplaatste blaauwe oplossing van hetzelfde koperzout geheel geabsorbeerd wordt.

Niet alleen zonlicht is in staat om de verschijnselen der fluorescentie te doen ontstaan; ook met electrisch licht, zelfs met het violette licht eener in het luchtledige overspringende inductievonk (353) gelukken bovengemelde proeven evenzeer. Daarentegen neemt men bij het licht van eene lamp, van eene kaars of van eene gasvlam, even als bij de door scheikundige middelen rood, geel of groen gekleurde vlammen eener alcohollamp, geene of nagenoeg geene fluorescentie waar. Dit komt omdat het vooral de blaauwe en violette stralen zijn, welke deze verschijnselen te voorschijn brengen.

Zeer opmerkelijk zijn de wijzigingen welke het gewone zonnespectrum ondergaat, wanneer men het op eene oplossing eener fluorescerende stof laat vallen. Men kan deze proef nemen, door het spectrum op een langwerpig glazen bakje met platte wanden te laten vallen. Bevindt zich in het bakje eene oplossing van zwavelzure quinine, dan ziet men de meeste lichtstralen en wel de minst breekbare door de oplossing heengaan; bij het blaauw begint de verstrooijing van het licht, hetwelk wordt voortgezet, niet alleen tot de strepen G en H van Frauenhofer, maar zelfs nog veel verder; het spectrum wordt dus aan den kant van het violet aanmerkelijk uitgebreid. In het gedeelte aan gene zijde van H worden eene menigte donkere strepen waargenomen. De kleur van het spectrum is ook eenigzins veranderd; zij is meer blaauwachtig en loopt in een blaauwachtig grijs uit. Men kan het onderscheid duidelijk maken, wanneer men de proef zoodanig inrigt, dat de onderste helft van het spectrum valt op een gewoon papieren scherm, de bovenste op de fluorescerende oplossing.

De andere fluorescerende stoffen vertoonen dergelijke verschijnselen. Tegen eene oplossing van bladgroen vertoont zich het spectrum als eene roode streep, die begint tusschen de strepen B en C van Frauenhofer en zich tot ver over de streep H uitstrekt. Tusschen C en D is het spectrum zeer helder rood; daarop volgt eene bijna donkere ruimte, die bij F in een karmozijnrood overgaat, om aan gene kant van H bruinrood te worden.

In plaats van eene oplossing der fluorescerende stoffen te gebruiken, kan

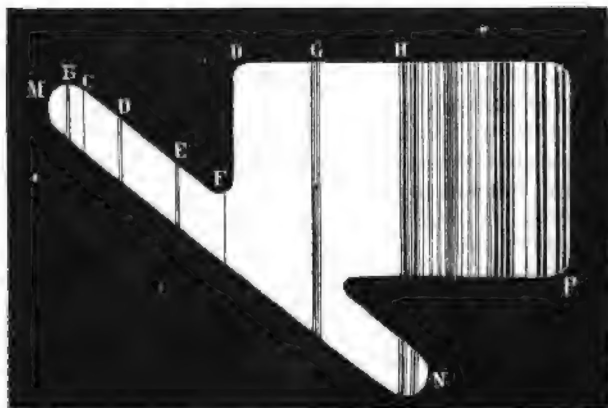
men ook papier met die oplossing bestrijken en daarop het spectrum opvangen. Het gedeelte van het spectrum, welks stralen onveranderd worden doorgelaten, vertoont zich dan op het aldus bereide papier even als op een gewoon scherm; alleen het gedeelte, waar de fluorescentie-verschijnselen worden waargenomen, vertoont zich dan anders. Op kurkuma-papier heeft het spectrum van F af eene vaalachtige groene kleur. Het heeft dan eene gedaante zooals in fig. 401 is afgebeeld; bij eene vergelijking van deze afbeelding met die van het gewone spectrum in fig. 399, vooral wanneer men daarbij op de strepen van Frauenhofer acht geeft, valt aanstonds het onderscheid in het oog.

Fig. 401.



Beschouwt men het op kurkuma-papier gevormde spectrum door een horizontaal prisma, dan zal men niet zoo als gewoonlijk een schuin spectrum waarnemen, maar een zeer gewijzigd spectrum, zooals in fig. 402 is voorgesteld. Dit beeld

Fig. 402.



bestaat uit twee gedeelten; het eene MN is het gewone, dat men ook zoude

waarnemen, zoo er geene fluorescentie plaats had; het andere OP is alleen door de fluorescentie veroorzaakt. De kleuren liggen daarin in horizontale rigting boven elkander, waaruit blijkt, dat de vaalachtig groene kleur, die men in het regtergedeelte van het spectrum waarnam, niet enkelvoudig, maar zamengesteld is. De strepen G en H gaan dwars door de verschillende kleuren, die men in het gedeelte OP waarneemt. Herhaalt men de proef met een spectrum, gevormd op papier, met eene andere fluorescerende stof bestreken, dan vertoont zich hetzelfde verschijnsel; alleen de kleuren in het buitengewone gedeelte kunnen eenigzins verschillen.

Deze eigenschap geeft een eenvoudig middel om te onderzoeken of een ligchaam al of niet fluorescerend is. Is zulks namelijk niet het geval, dan neemt men geen buitengewoon spectrum waar, wanneer men het door een vertikaal prisma op eene zekere stof gevormd spectrum door een horizontaal prisma beschouwt; bemerkt men wel zoodanig verschijnsel, als in fig. 402 is afgebeeld, al is het ook slechts in geringen graad, dan mag men daaruit afleiden, dat de stof, waarop het spectrum opgevangen is, fluoresceert. Stokes heeft na een zorgvuldig onderzoek bij eene menigte stoffen in eenen geringen graad fluorescentie gevonden.

De omstandigheid, dat de blaauwe en violette stralen het best de fluorescentie doen ontstaan, maakt het gemakkelijk het verschijnsel ook nog op andere wijze duidelijk te maken. In een donker vertrek laat men alleen licht komen door een blaauw glas, dat men in eene opening in het venster plaatst; bevinden zich in het vertrek dan voorwerpen van fluorescerende stoffen of met fluorescerende vloeistoffen bestreken, dan vertoonen die zich in een bijzonder helder licht, dat bij het blaauwe licht in het vertrek scherp afsteekt. Eene oplossing van zoodanige stof schijnt dan licht van zich af te geven, en letters met zulk eene oplossing op een wit papier geschreven vertoonen zich als lichtgevend op een blaauwen grond. Uraniumglas schijnt alsdan eveneens licht rondom zich te verspreiden.

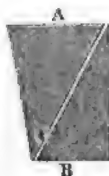
412. **Ultra-violette stralen van het spectrum.** — Uit het voorgaande blijkt, dat de lichtstralen in het spectrum niet ophouden waar wij de laatste violette stralen waarnemen, maar dat er zich daarnaast nog andere bevinden, die wij alleen onder bijzondere omstandigheden waarnemen. Deze stralen, welke nog meer breekbaar zijn dan de violette, worden door sommige ligchamen ook in sterke mate geabsorbeerd; vooral is dit het geval bij zwavelkoolstof, welke daarentegen de zigtbare stralen zeer volkomen doorlaat. Glas laat ze gedeeltelijk door. Men moet dus bij de bovengemelde proef (Fig. 400) de lens A

alsook het prisma, waardoor men het spectrum laat ontstaan, zoodanig kiezen, dat die stralen niet of slechts weinig geabsorbeerd worden. Flintglas is daartoe vrij geschikt; het allerbest echter worden zij doorgelaten, wanneer men zich van een prisma en eene lens van bergkristal bedient.

413. **Achromatische prisma's en lenzen.** — Wij hebben hiervóór (404) reeds opmerkzaam gemaakt op het onderscheid in dispersie, dat men bij verschillende stoffen waarneemt. Dat onderscheid is blijkens de toen opgegeven getallen veel aanzienlijker dan het verschil in brekingsvermogen. Van deze eigenschap maakt men gebruik om de zoogenaamde *achromatische* prisma's te vervaardigen, dat zijn zoodanige prisma's, die de eigenschap bezitten om de lichtstralen te doen afwijken zonder dispersie of ontleding, zoodat men daardoor geen gekleurd spectrum verkrijgt. Newton beweerde, dat zoo iets niet kon plaats hebben, daar hij in de meening verkeerde, dat het brekingsvermogen en de dispersie steeds onderling evenredig waren. Later echter heeft men bevonden, dat deze onderstelling onjuist was, en hebben zich de natuurkundigen toegelegd om achromatische prisma's en vooral achromatische lenzen, waarover straks nader, te vervaardigen. Dollond is de eerste geweest, die dit vraagstuk voldoende heeft opgelost (1757). Hoewel de eigenlijke oplossing op meer ingewikkelde wiskundige beschouwingen berust, zal men zich toch door het volgende een denkbeeld daarvan kunnen maken.

Zij A (Fig. 403) een prisma, waar achter een tweede van eene andere stof vervaardigd prisma B is geplaatst, zoodat de scherpe kant van het eene naar beneden, van het andere naar boven is gekeerd. Een lichtstraal op A invallende wordt gebroken en verstrooid; was B nu juist even groot als A en van dezelfde stof vervaardigd, dan zouden de afwijking en dispersie beide weder vernietigd worden. Indien echter B van eene andere stof is, welke een tweemaal grootere dispersie heeft, dan zal de uitwerking, voor zooverre de ontleding van het licht aangaat, geheel opgeheven zijn, wanneer B een brekingshoek heeft, ongeveer half zoo groot als die van A; de straal treedt dan kleurloos uit het tweede prisma; de afwijking is echter niet geheel weggenomen, daar het brekingsvermogen van de twee stoffen slechts weinig verschilt, ook dan wanneer het verschil in dispersie aanzienlijk is. Wil men proefondervindelijk bepalen, of de dispersie van het licht door de bijeenvoeging der beide prisma's zal zijn weggenomen, dan heeft men slechts de grootte na te gaan van het spectrum,

Fig. 403.

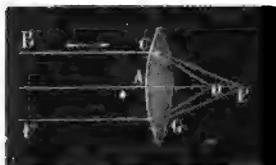


door elk der prisma's op zich zelf gevormd; zijn die beide even lang, dan zal het licht kleurloos er doorheen gaan.

Wij hebben hiervóór (404) voor de totale dispersie van flintglas opgegeven 0,0433, voor die van crownglas 0,0207; de eerste is dus nagenoeg 2,1 maal grooter. Is dus A een prisma van crownglas, dan zal de brekingshoek van B, zoo men daarvoor flintglas neemt, 2,1 maal kleiner moeten zijn, opdat bij beiden de dispersie dezelfde zal wezen. De afwijking door het crownglas-prisma A is echter veel aanzienlijker dan die door het flintglas-prisma B, zoodat de lichtstraal wel ongekleurd blijft, maar toch eene afwijking ondergaat, gelijk aan het verschil der afwijkingen door A en B afzonderlijk veroorzaakt. Hierbij valt nogtans op te merken dat, aangezien de verdeeling der kleuren in de spectra, door verschillende brekende en verstrooijende stoffen gevormd, niet volkomen dezelfde is, de door het eene prisma veroorzaakte kleuring niet volkomen door het tweede kan worden weggenomen, en er dus in de meeste gevallen altijd nog eene geringe kleuring zal worden waargenomen.

Van meer belang dan de achromatische prisma's zijn de achromatische lenzen. Om zich hiervan te overtuigen is het noodig na te gaan, hoe de breking door eene lens met dispersie gepaard gaat. Zij A (Fig. 404) eene lens, dan zal een daarop invallende lichtstraal BC te gelijk gebroken en ontleed worden.

Fig. 404.



De violette lichtstralen, als de meest breekbare, zullen de rigting CD volgen, terwijl de roode, welke de minst breekbare zijn, den weg CE volgen. In D vormt zich dus het brandpunt van de violette, in E dat van de roode stralen (1). Laat men het licht, dat door zoodanige lens gegaan is, vallen op een scherm, dat men ergens tusschen A en D plaatst, dan zal men bevinden, dat het beeld gekleurde randen heeft. Omgekeerd wanneer men door eene lens een voorwerp beschouwt, zal men daaraan gekleurde randen waarnemen, en wel des te meer, naarmate de lens boller is en de stralen meer gaan door het gedeelte van het glas, dat het verst van het middenpunt verwijderd is. Neemt men een gewoon vergrootglas en beschouwt men daarmede de letters op een wit papier, dan ziet men die, welker lichtstralen door het midden gaan, zuiver, doch daarentegen die, wier lichtstralen meer tot den rand der lens naderen, gekleurd. Daar, zoo als wij later zullen zien, de bolle lenzen

(1) In onze afbeelding is het verschil in rigting duidelijkheidshalve veel grooter voorgesteld. Voor flintglas bedraagt de afstand DE der brandpunten ongeveer $\frac{1}{20}$ van den brandpuntsafstand AD, voor crownglas slechts $\frac{1}{40}$.

gebruikt worden bij mikroskopen en verrekijkers, zoo zal men inzien, dat deze eigenschappen zeer nadeelig zijn om een zuiver beeld te verkrijgen, en dat het dus voor die werktuigen eene aanmerkelijke verbetering was, toen men die lenzen door achromatische wist te vervangen.

De achromatische lenzen worden op dergelijke wijze zamengesteld, als de achromatische prisma's, namelijk door de vereeniging van twee volkomen in elkander passende lenzen A en B (Fig. 405), waarvan de eerste A eene dubbelbolvormige lens van crownglas, de andere B eene divergerende lens van flintglas is. Bij eene juiste keus der afmetingen zal de dispersie der verschillend gekleurde stralen door de lens A weder worden opgeheven door de tweede lens B. Wel zal de brandpuntsafstand van zoodanig stel lenzen grooter zijn, dan wanneer men alleen de lens A gebruikt, maar dit kan niet opwegen tegen het zooveel grooter voordeel van eene lens te verkrijgen, waardoor alle lichtstralen ongekleurd doorgelaten worden, en welke dus veel zuiverder beelden geeft.

Fig. 405.

A B

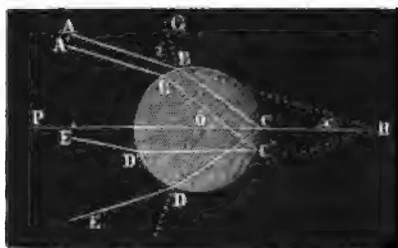
De achromatische lenzen waren in de eerste jaren slechts tegen zeer hooge prijzen te krijgen; tegenwoordig echter hebben vooral de hoogduitsche gezigtkundigen zich zoozeer op hare vervaardiging toegelegd, dat men in goedkoopere werktuigen ook zelfs achromatische lenzen aantreft.

414. **Regenboog.** — Alvorens deze afdeeling te sluiten moeten wij nog gewag maken van een verschijnsel, dat bij ieder bekend is, namelijk den regenboog, waarvan de verklaring gegeven kan worden door middel van de leer van de dispersie en straalbreking van het licht.

De regenboog is een lichtverschijnsel, dat men soms waarneemt wanneer men eene regenwolk voor zich en de zon achter zich heeft; het bestaat uit ééne, soms uit twee concentrische bogen, gekleurd met dezelfde kleuren als die, welke men in het zonnespectrum waarneemt. De onderste of binnenste boog bevat de kleuren in zoodanige volgorde, dat violet aan den binnenkant en rood aan den buitenkant voorkomt; bij den buitensten boog, die minder helder en ook niet altijd zigtbaar is, is de volgorde der kleuren juist de omgekeerden. De oorzaak moet gezocht worden in de straalbreking en dispersie van de van de zon komende lichtstralen in de regendruppels. Om zich daarvan rekenschap te geven, behoeft men slechts na te gaan wat er gebeurt, wanneer lichtstralen vallen op eenen bolvormigen waterdruppel, zoo als in fig. 406 is voorgesteld. Zij AB een invallende lichtstraal, dan wordt deze volgens BC gebroken; bij C wordt hij gedeeltelijk terug gekaatst volgens CD en bij D andermaal gebroken. Een tweede lichtstraal A'B', evenwijdig met AB inval-

lende, volgt een dergelijken weg, maar blijft daarmede niet evenwijdig, zoodat hij volgens D'E' uittreedt. Daaruit volgt, dat de lichtstralen tengevolge van de herhaalde breking, zeer divergeren, en dat dus de indruk, dien zij op een in den lichtbundel DED'E' geplaatst oog maken, veel zwakker is. Van al die stralen kunnen alleen die eenen merkbaren indruk maken, waarvoor die divergentie zoo gering mogelijk is, dat is, welke nagenoeg evenwijdig uittreden.

Fig. 406.



De voorwaarde, opdat dit geschiede, kan ongeveer op de volgende wijze gevonden worden. Zij $i = ABG$ de hoek van invalling, $r = CBO$ de hoek van breking; de hoek AHP is de halve afwijking tusschen den invallenden lichtstraal AB en den uittredenden DE; noemt men dien hoek x, dan blijkt uit de figuur, dat $POB = i + x = 2r$, dus $x = 2r - i$; daar voorts $\sin i = n \sin r$, zoo kan men door middel van de hoogere wiskunde berekenen, welke waarde r en i moeten hebben, opdat de verandering, welke x tengevolge van eene verandering van i ondergaat, zoo gering mogelijk zij. Men vindt dat zulks voor de roode stralen en de daarmede overeenkomende waarde van n het geval zal zijn, wanneer $i = 54^\circ 15'$ is, in welk geval $x = 21^\circ 1'$ en dus de afwijking $AHE = 42^\circ 2'$ is. De op zoodanige wijze invallende lichtstralen zullen dus nagenoeg evenwijdig weder uittreden; terwijl bij elken anderen hoek van invalling de uittredende lichtstralen veel meer divergeren. Doet men de berekening voor de violette lichtstralen, welke meer breekbaar zijn, dan vindt men voor den hoek AHE eene waarde van $40^\circ 16'$. Daar nu bij elke breking ontleding van het witte zonnelicht plaats heeft, zoo zal de uittredende lichtbundel van onderen rood en van boven violet zijn. Bevindt zich het oog zich in dit gedeelte van dien lichtbundel, waar zich de roode stralen bevinden, dan ontvangt dit den indruk van rood licht, terwijl het de andere kleuren niet bemerkt; dit zal het geval zijn met den bovensten regendruppel M in fig. 407. De lichtstraal ab, in dezelfde rigting op den lager geplaatsten druppel N invallende, zal, na tweemaal gebroken te zijn, ook in het oog O komen, doch alleen dan wanneer hij sterker gebroken is; dit zal het geval zijn met een meer breekbaren lichtstraal bijv. den violetten; het oog O ziet dan in de rigting OD rood, in de rigtiug Od violet licht en daartusschen de andere kleuren van het spectrum. De grootte van den hoek O, dat is de breedte van den ge-

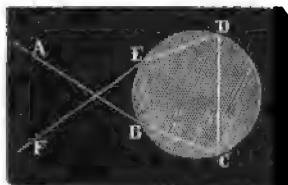
kleurden boog, laat zich gemakkelijk berekenen; hij moet blijkbaar gelijk wezen aan het verschil tusschen de waarden van de hoeken H en *h*; daar deze blijkens het voorgaande voor de twee uiterste kleuren 42° 2′ en 40° 16′ bedragen, zoo zoude hoek DO*d* 1° 46′ moeten bedragen, wanneer de zon een lichtgevend punt was; daar die echter zelve eene schijnbare middellijn van ongeveer 30′ heeft, zoo zal die hoek, of de breedte van den lichten strook, ongeveer 2° 16′ bedragen. Denkt men zich nu door O eene lijn OS getrokken evenwijdig met AB en *ab*, en de geheele figuur om die lijn omwentelende, dan zullen de lijnen OD en O*d* kegelvlakken beschrijven, waarop alle regendruppels zullen gelegen zijn, welke lichtstralen van dezelfde kleur naar het oog zenden. Het oog bevindt zich dus in het toppunt van dien kegel; het ziet derhalve slechts een gedeelte van den ring, begrepen tusschen de cirkels, door D en *d* bij die omwenteling beschreven. De schijnbare straal van den regenboog wordt dus uitgedrukt door den hoek DOS en bedraagt dus 42° 2′. Het oog ligt altijd in de regte lijn, die het middenpunt der zon met dat van den regenboog verbindt. Loopen AB en *ab* en dus ook OS evenwijdig met den horizon, dat is, wanneer de zon zelve in den horizon staat, dan zal de regenboog juist een halven cirkel vormen. Staat de zon hooger, dan wordt de hoek, dien OD met het horizontale vlak maakt, kleiner; hoe hooger dus de zon staat, des te kleiner is de regenboog. Staat de zon 42° boven den horizon, dan kan zich geen regenboog in ons oog vormen.

Fig. 407.



De tweede of buitenste regenboog ontstaat op dezelfde wijze, alleen met dat onderscheid, dat de lichtstralen tweemaal worden teruggekaatst, zooals in fig. 408 is voorgesteld, waar de invallende lichtstraal AB bij B gebroken, bij C en daarna bij D teruggekaatst, en eindelijk bij E nogmaals gebroken wordt, zoodat hij in de rigting EF uittreedt. De hoek, dien de invallende en uittredende lichtstralen AB en EF dan met elkander

Fig. 408.



moeten maken, opdat de evenwijdig invallende lichtstralen zoo nabij mogelijk evenwijdig uittreden, bedraagt dan voor het roode licht 50° 59′, voor het violette 54° 9′. Het licht heeft echter door de dubbele terugkaatsing veel van zijne sterkte verloren, zoodat de regenboog veel minder helder is; dat de kleuren elkander in omgekeerde orde opvolgen, is eveneens het gevolg van die dubbele terugkaatsing.

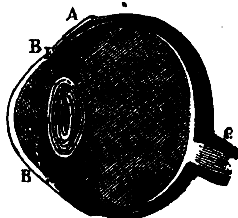
Men kan de juistheid van het voorgaande proefondervindelijk aantoonen, door in een donker vertrek een lichtbundel te laten vallen op een met water gevulden of een massief glazen bol. Door den hoek van invalling verschillende waarden te geven zal men zich kunnen overtuigen, dat voor de hierboven aangeduide waarde de divergentie der uittredende stralen de geringste is.

De stralen, welke zoodanig invallen, dat zij het verschijnsel van den regenboog kunnen teweeg brengen, worden doorgaans *active* of *werkzame* stralen genoemd.

E. HET GEZIGT EN DE GEZIGTKUNDIGE WERKTUIGEN.

415. **Het menschelijk oog.** — De gewaarwording van licht en kleur heeft hare oorzaak in eene aandoening van zekere zenuwen, tot welke de lichtstralen zich voortplanten. Alvorens echter tot die zenuwen te geraken, ondergaan zij in het oog eene breking of ontleding, zonder welke geen duidelijk zien mogelijk is. Alvorens dus de verschillende verschijnselen te bespreken, die zich bij het zien voordoen, moeten wij in de eerste plaats eene beschrijving geven van het zintuig van het gezigt, zooals het bij den mensch en de meeste gewervelde dieren wordt aangetroffen.

Fig. 409.



In fig. 409 is eene doorsnede van het oog voorgesteld. De geheele oogappel is omringd door een tamelijk hard vlies AA, de *harde oogrok* genaamd, dat ondoorschijnend is, behalve aan het voorste gedeelte BB, dat een weinig sterker gebogen en doorschijnend is en het *hoornvlies* genoemd wordt; aan den tegenovergestelden kant heeft het eene opening, waardoor de gezigtszenuw C gaat; de oogrok of het ondoorschijnend hoornvlies is datgene, wat wij gewoon zijn het wit van het oog te noemen. Achter het hoornvlies ligt het *regenboogsvlies* of *iris*, in doorsnede

bij EDDE voorgesteld; in het midden der iris bevindt zich eene cirkelvormige opening DD, welke den naam van *pupil* draagt en, indien men het oog van buiten beschouwt, zwart schijnt. Achter de iris bevindt zich een in een doorschijnend vlies gehuld lensvormig ligchaam F, dat volkomen doorschijnend is, aan den voorkant minder gebogen is dan aan den achterkant, en bestaat uit concentrische lagen, die in het midden harder zijn dan aan de oppervlakte; dit gedeeite van het oog heet de *kristallens*. Tusschen het hoornvlies en de kristallens bevindt zich eene heldere vloeistof, het *waterachtige vocht* genaamd; de geheele inwendige ruimte G van het oog achter de kristallens is met eene eiwitachtige vloeistof gevuld, die den uaam van *glasachtig vocht* draagt. Buiten om den harden oogrok AA bevindt zich binnen in het oog een vlies, dat *adervlies* heet, en daarbuiten aan het achterste gedeelte van het oog het *netvlies*, dat eigenlijk slechts eene uitbreiding van de gezigtszenuw C is. Het adervlies is zwart gekleurd, zoodat binnen in het oog geene terugkaatsing van licht tegen de wanden kan plaats hebben.

Blijkens het voorgaande kan men het oog het best vergelijken met eene donkere kamer of camera obscura, waarvan de kristallens F de lens is, op welke de lichtstralen invallen, na door het hoornvlies BB en door de pupil DD, die als draphragma dient, gegaan te zijn; het door de lens ontstaande beeld wordt gevormd op het netvlies aan de achterzijde, en aldus door de gezigtszenuw C tot de hersens overgebragt. Van het ontstaan van zoodanig beeld, dat volgens de eigenschappen van de biconvexe lenzen omgekeerd moet zijn, kan men zich proefondervindelijk overtuigen door een oog van het een of ander dier te nemen, waarin men aan den achterkant in het hoornvlies eene opening heeft gemaakt, zoodat het netvlies bloot ligt; het gemakkelijkst geschiedt dit met het oog van een konijn, daar het achterste gedeelte van het hoornvlies bij die dieren doorschijnend en het adervlies ongekleurd is, zoodat deze niet behoeven te worden weggenomen.

416. **Zuiverheid van het op het netvlies gevormde beeld.** — Wij hebben hiervóór bij de vermelding der eigenschappen van de lenzen doen opmerken, dat het daardoor gevormde beeld doorgaans niet volkomen zuiver is. Dit is echter met dat, hetwelk op het netvlies van een gezond oog ontstaat, wel het geval; deze eigenschap moet worden toegeschreven aan de kromming van de beide oppervlakten der kristallens, die niet bolvormig zijn, en vooral aan de werking van de iris. Tengevolge van het niet bolvormig zijn van de oppervlakten der kristallens heeft hier geene afwijking door bolvormigheid plaats; de stralen, die op dat gedeelte van de kristallens zouden

vallen, dat het meest van het midden verwijderd is, worden bovendien door de iris tegengehouden. De iris heeft voorts de eigenschap van zich meer of min zamen te kunnen trekken, zoodat de opening grooter of kleiner kan worden; de middellijn der pupil kan tusschen 3 en 7 strepen afwisselen; zij wordt grooter, als men naar een verwijderd voorwerp ziet, naauwer als men een digt bij het oog gehouden ligchaam aanschouwt. Bij den mensch blijft de pupil steeds cirkelvormig; bij sommige dieren neemt zij ook andere gedaanten aan; onder anderen is dit bij de katten het geval; in het sterke daglicht heeft zij bij die dieren de gedaante van eene smalle, naar boven en naar onderen spits uitloopende spleet; in een tamelijk donker vertrek daarentegen is zij nagenoeg cirkelvormig.

De beelden, die op het netvlies gevormd worden, hebben dezelfde kleuren als de voorwerpen, van welke de lichtstralen uitgaan; zij zijn van geene gekleurde randen voorzien, zooals die, welke door eene gewone glazen lens ontstaan; aan de voorwerpen, welke wij rondom ons zien, nemen wij ook geene gekleurde randen waar. Op grond van deze waarneming heeft men het oog voor volmaakt achromatisch gehouden. Uit onderzoekingen van Wollaston en anderen is echter gebleken, dat er eene geringe dispersie van licht bij de breking der lichtstralen door de kristallens plaats heeft. Dat wij echter geene kleuren, welke daardoor zouden moeten ontstaan, waarnemen, moet alleen daaraan worden toegeschreven, dat de stralen, die door de pupil gaan, slechts zeer weinig divergeren, zoodat de dispersie uiterst gering moet zijn.

Wij hebben zoo even gezegd, dat het op het netvlies gevormde beeld door de gezigtszenuw tot de hersens wordt overgebragt; hoe dit geschiedt, kunnen wij niet verklaren. Evenzeer is het moeijelijk eene voldoende reden te geven, waarom wij de voorwerpen niet omgekeerd zien, terwijl toch het beeld op het netvlies steeds omgekeerd is; de beantwoording dezer vraag zoude eerst dan gegeven kunnen worden, als men kon verklaren, hoe de door het netvlies ontvangen indruk tot bewustzijn wordt gebragt. Dit moet echter hierbij wel in het oog gehouden worden, dat wij de aanwezigheid der voorwerpen niet alleen door het gezigt, maar ook door andere zintuigen bemerken, en dat de overeenstemming tusschen de door onze verschillende zintuigen gemaakte waarnemingen zeker grooten invloed uitoefent op datgene, wat door elk dier zintuigen afzonderlijk wordt waargenomen.

417. **Gezigtsveld.** — Wanneer men regtuit ziet, dan bewerkt men niet alleen het voorwerp of het punt, waarnaar men het oog gerigt heeft, maar eene menigte andere, die zich daarboven en daaronder, regts en links, be-

vinden. De ruimte, waarin zich die voorwerpen bevinden, welke een meer of minder duidelijk beeld op het netvlies vormen, noemt men het *gezigtsveld*. Dit bedraagt volgens Brewster 120° in vertikale en 150° in horizontale rigting. De uitgebreidheid van het gezigtsveld moet worden toegeschreven aan de kromming van het hoornvlies BB (Fig. 409), welke oorzaak is dat zeer schuins invallende stralen daardoor kunnen gaan, om verder door de pupil tot de kristallens te geraken.

Hoewel dien ten gevolge eene menigte voorwerpen zich in het gezigtsveld kunnen bevinden en dus gezien worden, zoo is het er echter ver van af, dat zij alle even duidelijk gezien worden. Integendeel is het veld van het volkomen duidelijk zien slechts klein. Men kan zich daarvan overtuigen, wanneer men bijv. de op deze bladzijde gedrukte letters op eenen afstand van ongeveer 3 palmen beschouwt; men zal dan slechts eenige letters, hoogstens een tiental, volmaakt duidelijk waarnemen; de andere ziet men wel, maar men onderscheidt ze niet juist. Doorgaans bemerkt men zulks echter niet, omdat de as van het oog, dat is de lijn, die door het midden van de kristallens en van de pupil gaat, zich zoo gemakkelijk en als 't ware zonder dat men het zelf bemerkt, verplaatst. Als maximum van het volmaakt helder zien kan men een gezigtshoek van 4° stellen.

Een juist oordeel over den afstand en de ware grootte der voorwerpen kan alleen door oefening verkregen worden. De schijnbare grootte der voorwerpen, dat is de hoek waaronder men die ziet, hangt af van den afstand; voorwerpen van verschillende grootte kunnen even groot schijnen, mits zij slechts op verschillende afstanden van het oog geplaatst zijn. Door vergelijking met andere daarbij gelegene voorwerpen, wier grootte ons bekend is, alsook door het meer of minder duidelijke der voorwerpen zelven, is het na eenige oefening niet moeijelijk, met naauwkeurigheid de ware grootte en den afstand van ver afgelegene voorwerpen te schatten.

418. **Afstand van het duidelijk zien; accommodatie-vermogen van het oog.** — Wij hebben in het voorgaande het oog leeren kennen als een werktuig, waarvan eene lens, de kristallens, het voorname bestanddeel uitmaakt, en hebben daarbij de opmerking gemaakt, dat men alleen die voorwerpen duidelijk ziet, waarvan zich een duidelijk beeld op het netvlies vormt. De plaats, waar bij eene lens een duidelijk beeld van eenig voorwerp ontstaat, is echter afhankelijk van den afstand van dat voorwerp; daaruit zoude dus moeten volgen, dat wij alleen die voorwerpen, die zich op eenen bepaalden afstand van het oog bevinden, duidelijk zien. In zeker

opzigt is dit waar, daar de ondervinding leert, dat men de voorwerpen, die zich op eenen afstand van 2½ tot 3 palm van het oog bevinden, het best kan zien en ook zonder het oog te vermoeijen gedurende langen tijd kan aanschouwen. De ondervinding leert ons echter, dat ook van ligchamen, die op grooteren of kleineren afstand van het oog geplaatst zijn, een duidelijk beeld kan gevormd worden, en dat dus het oog zich als 't ware schikt naar die afstanden. Deze eigenschap noemt men het *accommodatie-vermogen* van het oog.

Langen tijd is men in twijfel geweest, waaraan het oog dit vermogen ontleent; sommigen meenden, dat het zich kan verlengen of inkrimpen, zoodat de afstand van het netvlies tot de kristallens grooter of kleiner wordt; anderen waren van gevoelen, dat de verklaring dier eigenschap in eene verandering van de kromming van het hoornvlies moet gezocht worden. Door de onderzoekingen van Helmholtz, en vooral door die van onze landgenooten Cramer en Donders is het voldoende bewezen, dat de oorzaak van het accommodatie-vermogen van het oog alleen moet gezocht worden in het vermogen van de kristallens om eenen eenigzins anderen vorm aan te nemen, zoodat hare voorste oppervlakte iets boller wordt, wanneer men een digter bijgelegen voorwerp naauwkeurig beschouwt, doch vlakker, als men naar een verder afgelegen ligchaam ziet. Men zal inzien, dat in beide gevallen het beeld zich duidelijk op het netvlies zal kunnen vormen. Tevens volgt er uit, dat men niet te gelijk een verwijderd en een nabijliggend ligchaam duidelijk kan zien; dit leert ook de ondervinding, want plaatst men twee voorwerpen op ongelijken afstand van het oog, doch zoodat men beide te gelijk kan zien, dan zal, wanneer het oog zich tot het eene accommodeert, het andere minder duidelijk schijnen.

419. **Bijzienden en verzienden; brillen.** — Hetgeen wij zoo even hebben opgemerkt, dat men op een afstand van 2½ tot 3 palm het duidelijkst kan zien, geldt alleen voor een gezond oog, dat zich in den natuurlijken toestand bevindt. Bij sommige menschen is die afstand geringer, bij andere grooter; hen, die in het eerste geval verkeeren, noemt men *bijzienden*, de anderen *verzienden*. De oorzaak van dit gebrek is in beide gevallen gelegen in de kristallens, die in het eerste geval te bol, in het tweede niet bol genoeg is, terwijl tevens het oog zijn gewoon accommodatie-vermogen niet of althans in geringere mate bezit.

Men kan dit gebrek verhelpen door voor het oog eene lens te plaatsen, die voor bijzienden divergerend, voor verzienden convergerend moet zijn. De

werking van die lenzen, die men *brillen* noemt, bestaat daarin, dat zij voor bijzienden de rigting van de lichtstralen zoodanig verandert, dat zij, in plaats van uit een punt A (Fig. 410)), van een digter bijgelegen punt B schijnen te komen. Voor verzienden daarentegen schijnen zij, in plaats van uit het meer nabij gelegen punt C (Fig. 411), van het meer verwijderde punt D uit te gaan.

Fig. 410.

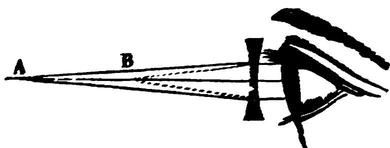
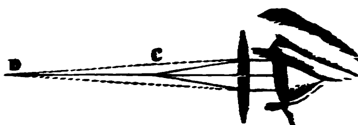


Fig. 411.



De stralen, die niet door het midden van het brilleglas tot het oog komen, maar door de digter bij den rand geplaatste gedeelten, moeten in schuine rigting daar door gaan; het gevolg daarvan is, dat de afwijking wegens sphericiteit daarvoor vrij aanzienlijk en dus het beeld niet duidelijk is. Wollaston heeft voorgeslagen om, ten einde in dit gebrek te voorzien, concaaf-convexe glazen te gebruiken, door hem *periskopische* glazen genoemd, en waarvan de kromming aan de binnenste oppervlakte zooveel mogelijk met die van het oog, of beter gezegd, met die van het hoornvlies overeenkomt.

420. **Ongevoelig punt van het netvlies.** — Wanneer men op een wit papier twee zwarte stippen A en B maakt, op eenen onderlingen afstand van ongeveer eene palm, en dit papier op korten afstand plaatst van de oogen, zoodanig dat het regter oog zich boven de linker stip A bevindt, dan zal men bemerken, dat wanneer men het papier langzamerhand verwijdert, doch zorg draagt, dat de lijn, die de beide stippen verbindt, evenwijdig blijft aan die, welke door de beide oogen gaat, men de regter stip B niet ziet, wanneer het papier zich ongeveer op den afstand van het oog bevindt, waarop men het duidelijkst ziet. Het best gelukt deze eenvoudige proef, wanneer men het linker oog gesloten houdt. De verklaring van dit verschijnsel is deze. Ten gevolge van het veranderen van den afstand tusschen het papier en het oog, verplaatst zich het beeld van de zwarte stip B op het netvlies; op het oogenblik dat men haar niet ziet, wordt het beeld gevormd in een punt, dat ongevoelig is voor dien indruk en daarom het ongevoelige punt of ook wel de *blinde vlek* genoemd wordt; dit punt bevindt zich juist daar, waar de gezigtszenuw ingeplant is.

421. **Irradiatie.** — Wanneer men een op een zekeren afstand geplaatst helder ligchaam tegen een donkeren grond aanschouwt, dan doet zich dat ligchaam grooter voor dan het werkelijk is; bevindt zich omgekeerd een donker voorwerp voor een helder verlichten grond, dan heeft het omgekeerde plaats. Men kan zich hiervan gemakkelijk overtuigen, door op een wit papier eene zwarte cirkelvormige vlek te maken en omgekeerd een juist even groot wit papieren schijfje op een zwart papier te plakken. Plaatst men dan beide in het heldere zonnelicht op een afstand van een paar ellen van het oog, dan schijnt de witte ronde plek veel grooter dan de zwarte. Volgens de onderzoekingen van Plateau (1837) is dit verschijnsel, door hem *irradiatie* genoemd, sterker naarmate het licht sterker is; het is ook voor den eenen waarnemer aanzienlijker dan voor den anderen, en kan zelfs voor denzelfden op verschillende tijden ongelijke sterkte hebben. De oorzaak moet waarschijnlijk daarin gezocht worden, dat de indruk, welken de sterk lichtgevende stralen op het netvlies maken, zich verder uitstrekt dan de omtrek van het daarop gevormde beeld.

422. **Duur van den indruk op het netvlies.** — Wanneer het netvlies eenen indruk heeft ontvangen van een voorwerp, dan houdt die indruk niet oogenblikkelijk op, wanneer het op het netvlies gevormde beeld verdwijnt, maar duurt nog een kort oogenblik daarna voort. Neemt men bijv. een helder ligchaam en slingert men dit met behulp van een touw in de rondte, dan bemerkt men het ligchaam zelf niet, maar wel een lichten cirkel. De indruk, dien het oog van dat ligchaam heeft ontvangen, toen het zich op eenig punt van zijnen weg bevond, heeft dus nog niet opgehouden, wanneer het zich reeds in een ander punt van dien weg bevindt, en men ziet het dus als 't ware te gelijk op verscheidene plaatsen. De duur van dien indruk laat zich moeijelijk bepalen; hij hangt ook af van de meerdere of mindere sterkte van het door het voorwerp afgegeven licht; gemiddeld kan men dien duur op ongeveer eene halve seconde stellen.

Omgekeerd moet ook het beeld een zekeren tijd op het netvlies blijven, opdat die indruk tot de hersens kan worden overgebragt. Gaat een voorwerp met groote snelheid voorbij, zooals bijv. met een kanonskogel het geval is, dan is de duur van den indruk niet lang genoeg en men bemerkt er dus niets van.

Men heeft verschillende toestellen vervaardigd, welke op den duur van den indruk van het licht op het netvlies gegrond zijn. Wij zullen die hier niet beschrijven, maar slechts eene eenvoudige proef vermelden, die men gemak-

kelijk kan nemen. In eene schijf van wit bordpapier maakt men aan twee tegenovergestelde punten gaatjes, waarin men draden vastmaakt, zoodat men door middel van die draden de schijf gemakkelijk kan in de rondte draaijen in dier voege, dat men beurtelings hare beide oppervlakken ziet. Maakt men nu op den eenen kant dier schijf eene breede zwarte horizontale streep, op den anderen eene vertikale, dan ziet men, bij het schielijk omdraaijen, een zwart kruis, daar de indruk van de eene streep nog niet heeft opgehouden, als die van de andere reeds begint. Men kan ook op elken kant een gedeelte van eene teekening maken; draait men dan de schijf schielijk om, dan ziet men de teekening in haar geheel, alsof zij geheel op denzelfden kant geteekend was.

423. **Zien met twee oogen.** — Bij al hetgeen vooraf is gegaan hebben wij slechts van één oog gesproken; wij moeten nu nagaan, hoe wij met twee oogen zien.

Op elk netvlies moet zich een beeld vormen van het voorwerp, waarnaar het oog gerigt is; niettemin zien wij doorgaans slechts één beeld, althans wanneer het oog zich accommodeert naar den afstand van het voorwerp. De oorzaak van dit enkelvoudig zien met beide oogen moet waarschijnlijk daarin gezocht worden, dat twee overeenkomstige punten op de beide netvliezen in verband staan met een zelfden zenuwdraad in de hersenen, die daar, waar de beide gezigtszenuwen, welke van de oogen naar de hersenen leiden, elkander kruisen, in tweeën gesplitst is. Dientengevolge vallen de twee indrukken, door de beide gezigtszenuwen tegelijk overgebragt, zamen, en geven dus in de hersenen slechts een enkelen indruk.

Beschouwt men een voorwerp naauwkeurig, zoodat de beide gezigtsassen daarheen gerigt zijn, dan ziet men een verderaf of digterbij gelegen voorwerp dubbel; men kan zich daarvan overtuigen door twee stokjes of zelfs twee vingers achter elkander op ongelijken afstand van het oog te houden. Ziet men dan naar den voorsten vinger, dan ziet men den achtersten dubbel; rigt men de oogen naar den achtersten, dan schijnt de voorste dubbel te zijn. Dit is eenvoudig daaraan toe te schrijven, dat, terwijl de oogen zich zoodanig naar den afstand van het eene voorwerp accommoderen, dat de beelden op twee overeenkomstige plaatsen der netvliezen gevormd worden, die van het verder af of digterbij gelegene voorwerp zich vormen op twee plaatsen, waarvan het eene regts en het andere links van die twee overeenkomstige punten gelegen is. Deze indrukken worden dus niet door de vertakkingen van eene zelfde zenuw overgebragt, maar van verschillende zenuwen, zoodat elk op zich zelf een indruk in de hersenen veroorzaakt. Om evenwel een voorwerp met beide

oogen te zien is het niet noodig, dat de beide oogassen juist daarop gerigt zijn en dat het beeld dus in elk oog op het midden van het netvlies valt; was dit toch het geval, dan zoude men nimmer meer dan één voorwerp enkelvoudig en alle andere dubbel zien. De ondervinding leert, dat men eene menigte voorwerpen tegelijk enkelvoudig zien kan; dit laat zich daardoor verklaren, dat de beide beelden van elk voorwerp in dat geval op overeenkomstige plaatsen van de beide netvliezen vallen.

Worden de beelden van een voorwerp op zoodanige wijze gevormd, dan zal de indruk, welke de hersenen daarvan ontvangen, ongetwijfeld sterker moeten zijn; met twee oogen ziet men dus helderder dan met een. Ook dit ondervindt men ieder oogenblik. Proefondervindelijk kan men er zich nog van overtuigen, door een stuk wit papier voor de oogen te houden en dan tusschen het eene oog en het papier een donker scherm te houden, in dier voege, dat men een gedeelte van het wit papier met beide oogen, en een gedeelte met slechts één oog ziet; het eerste gedeelte schijnt dan veel helderder wit te zijn.

Den afstand van nabijgelegen voorwerpen kan men met twee oogen veel beter schatten dan met één oog. Door eene eenvoudige proef kan men zich daarvan overtuigen. Aan een dunnen draad hangt men een ring op van een duim of vijf middellijn; vervolgens neemt men een aan het uiteinde omgebogen ongeveer zeven palm langen stok in de hand, en tracht het omgebogen uiteinde in den ring te steken. Houdt men beide oogen open, dan kan men dit gemakkelijk doen; sluit men echter een oog, dan zal men meestal mistasten, omdat het zien met één oog niet voldoende is om den afstand, waarop de ring zich van het oog bevindt, juist te gissen.

Wordt een voorwerp op een niet al te grooten afstand van de oogen gehouden, dan kunnen de beide beelden, die zich op de twee netvliezen vormen, onmogelijk volkomen dezelfde zijn. Dat, hetwelk op het linker netvlies gevormd wordt, zal zoodanig zijn, alsof men het meer van den linkerkant beschouwt, terwijl daarentegen het op het regter netvlies gevormde gedeelten van den regterkant van het voorwerp zal bevatten, die in het andere niet gevonden worden. Bij eene oppervlakkige beschouwing zoude men meenen, dat de gelijktijdige indruk van twee zoodanige beelden eenigzins tot verwarring aanleiding moet geven; dit is echter niet het geval, daar door het zamenvallen dier twee beelden als 't ware een volmaakter beeld ontstaat, dat zich van een enkelvoudig beeld daardoor onderscheidt, dat het ligchamelijk schijnt. Beschouwt men een voorwerp met beide oogen, dan erkent men daaraan terstond, welke deelen vooruitkomen en welke wijken; bij eene beschouwing met één oog erkent men dit niet zoo spoedig.

424. **Stereoskoop.** — Op deze eigenschap berust een eenvoudige toestel, het eerst door Wheatstone (1844) uitgedacht en door hem *stereoskoop* genoemd, welke te gelijk als bevestiging en als toepassing dezer eigenschap dienen kan. Het doel van den stereoskoop bestaat eenvoudig daarin, om aan elk oog door eene vlakke teekening een indruk mede te deelen, welke juist zoodanig is als die, welke het van een ligchamelijk voorwerp zoude ontvangen; door de zamenwerking en gelijktijdige overbrenging dier twee indrukken is het dan juist, alsof men niet de twee verschillende teekeningen van hetzelfde voorwerp, maar dat voorwerp zelf ligchamelijk voor zich ziet.

Wheatstone heeft zijn stereoskoop zoodanig ingerigt, dat elk oog ziet in een spiegeltje, waarin de teekening wordt teruggekaatst. Zijn toestel is, wat het beginsel aangaat, voorgesteld in fig. 412. AB en AC zijn twee spiegels, die een regten hoek met elkander maken en zoodanig van elkander zijn gescheiden, dat wanneer men de oogen daarvoor plaatst, het linker oog O alleen in den spiegel AB, het regteroog O′ alleen in AC ziet. Tegen de schermen DD en EE worden nu twee verschillende teekeningen geplaatst, op zoodanige wijze, dat wanneer de oogen die in de beide spiegels waarnemen, de daarvan bij QQ′ en N′N gevormde beelden elkander juist bedekken. Is nu het beeld der teekening LL′ zoodanig, als men het voorwerp, bijv. eene met den top naar ons toegekeerde regelmatige vierhoekige piramide, alleen met het linkeroog zoude zien, zoo als met de teekening S (Fig. 413) het geval zal zijn, en is daarentegen de teekening RR′ zoo als in T is voorgesteld, zoodat haar beeld NN′ zoodanig is, als het regteroog alleen de piramide zien zoude, dan maken de gelijktijdige indrukken van die beelden op de beide oogen juist dezelfde uitwerking, alsof men achter de spiegels bij QN die piramide zelve zag; de top schijnt dan vooruit te steken en men zoude zelfs de verhouding

Fig. 412.

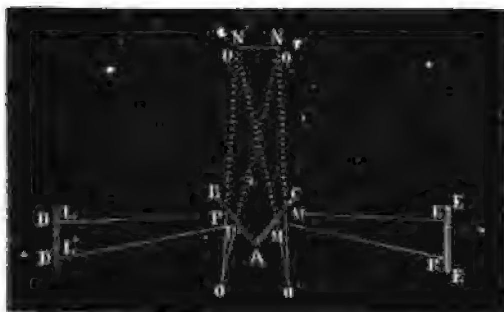
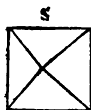
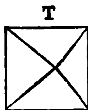


Fig. 413.

S



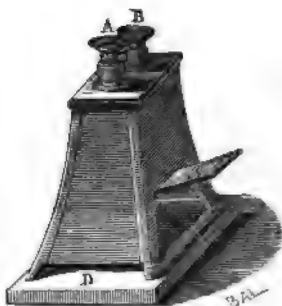
T



tusschen hare hoogte en basis kunnen schatten. Hierbij valt echter nog op te merken, dat de beelden LL' en RR' omgekeerd tegen de schermen DD en EE moeten geplaatst worden, omdat door de terugkaatsing tegen de spiegels AB en AC de daardoor gevormde beelden omgekeerd worden.

Brewster heeft aan den stereoskoop eene andere gedaante gegeven, welke in fig. 414 is voorgesteld, en die thans algemeen voor deze soort van werktuigen is aangenomen. Daaraan zijn geene spiegels, maar twee convergerende lenzen A en B, voor elke van welke men een oog plaatst. Op den bodem D van de doos bevinden zich twee teekeningen van hetzelfde voorwerp, doorgaans op een zelfde papier naast elkander vervaardigd, en zoodanig, dat de linksche teekening een beeld geeft van het voorwerp, zoo als men het alleen met het linkeroog zoude zien, de regtsche daarentegen het voorwerp voorstelt, zooals het regteroog alleen het zoude waarnemen. Doorgaans zijn de lenzen zoodanig aangebragt, dat men ze in en uit kan schuiven, ten einde ze te stellen op den afstand, waarop het oog door die lenzen het duidelijkst ziet. Het hulpmiddel van de lenzen dient eigenlijk slechts daartoe, om het beeld grooter en duidelijker te maken en het bezwaar van den te korten afstand tot het oog weg te nemen. Men zoude even goed een stereoskoop kunnen vervaardigen zonder lenzen, mits men slechts zorg droeg, dat elk oog alleen de daarvoor bestemde teekening zag, hetgeen door een middenschot zou kunnen verkregen worden.

Fig. 414.



In plaats van in den stereoskoop twee verschillende teekeningen van hetzelfde voorwerp te plaatsen, kan men er ook twee gedeelten eener zelfde teekening in houden, waarvan dan de resulterende indruk op beide oogen dezelfde zal zijn, alsof men de teekening in haar geheel zag. Plaatst men achter de eene lens een rood gekleurd papier en achter de andere een groen, dan zal, daar deze kleuren complementair zijn, de indruk dezelfde zijn, alsof men een wit papier zag, althans wanneer de kleuren goed gekozen zijn, hetgeen doorgaans nog al moeijelijk is.

425. **Physiologische of subjective kleuren.** — Bij de voorgaande verschijnselen hebben wij hoofdzakelijk onze aandacht gevestigd op de gedaante der bij het netvlies gevormde beelden; wanneer men op de kleuren

dier beelden acht geeft, dan neemt men ook zeer belangrijke verschijnselen waar. De waargenomene kleur hangt namelijk niet alleen af van het voorwerp, dat men aanschouwt, maar ook van den waarnemer zelven. Het gebeurt namelijk, dat het oog door eenen voorafgeganen indruk een volgenden anders waarneemt, dan zonder dat het geval geweest zoude zijn; de kleuren, die in zoodanige gevallen worden waargenomen en die eigenlijk haren oorsprong niet hebben in het aanschouwde voorwerp, noemt men *physiologische* of *subjectieve kleuren.* Wij zullen eenige verschijnselen vermelden, die hiertoe behooren.

Heeft men eenige oogenblikken een sterk verlicht wit papier aanschouwd, waarop een helder rood kruis geteekend is, en neemt men daarna dat papier weg, dan ziet men een groen kruis. Hetzelfde is het geval, wanneer men de oogen sluit of met een ondoorschijnend voorwerp bedekt. Ook met andere kleuren kan men de proef nemen; zoodra de aanschouwde kleur wordt weggenomen, ziet men hetzelfde voorwerp, maar in de complementaire kleur van de eerste. Nog duidelijker kan men dit verschijnsel waarnemen met den volgenden, door Nörremberg uitgedachten toestel. In eene houten lijst plaatst men een scherm, dat met gekleurd papier beplakt is; dit scherm beschouwt men scherp, hetgeen gemakkelijker geschiedt, wanneer men daarvoor een of ander klein voorwerp, bijv. een looden kogeltje ophangt. Daarna laat men plotseling voor het gekleurde scherm een ander neêrvallen, dat met wit papier beplakt is; dit schijnt dan niet wit, maar met de complementaire kleur gekleurd. Men kan de proef nog verrassender maken, wanneer men het eerste scherm niet geheel met eene zelfde kleur beplakt, maar bijv. in het midden groen en aan de randen rood maakt. Plaatst men dan plotseling het witte scherm er voor, dan schijnt dit in het midden rood en aan de randen groen.

Beschouwt men door een van binnen zwart gemaakten koker met één oog een helder verlicht rood gekleurd papier, en ziet men dan, na den koker weggenomen te hebben, naar een witten muur, dan ziet men eerst een groen beeld, daarna een zwakker rood beeld, vervolgens weder een groen, en zoo voort; Plateau zag op die wijze tot negen elkander afwisselende beelden, wanneer de eerste indruk sterk geweest was. Sluit men het oog, in plaats van naar eene witte oppervlakte te zien, dan neemt men hetzelfde verschijnsel waar, doch in minder sterke mate.

De oorzaak dezer verschijnselen moet blijkens de onderzoekingen van Plateau alleen in het oog, of liever in het netvlies gezocht worden. Wanneer dit eenen indruk van een sterk licht ontvangen heeft, dan komt het niet aanstonds weder tot rust, maar eerst langzamerhand, niet echter steeds afnemende, maar als 't ware met golvingen of trillingen, even als een slinger, die ook

eerst na eenige schommelingen tot rust komt. Wordt het netvlies plotseling aan eenen lichtindruk onttrokken, dan heeft er als 't ware eene zekere reactie plaats, die des te sterker zal zijn, naarmate de indruk zelf sterker was. De afwisseling van kleuren bij de zoo even vermelde proef van Plateau vindt in deze theorie hare volkomene verklaring.

Tot deze soort van verschijnselen moeten ook nog de zoogenaamde *contrastkleuren* gebragt worden. Legt men een stukje graauwachtig wit papier op een groot stuk ligtgroen papier, dan schijnt het kleine stukje rood te zijn; wordt het op een blaauw papier gelegd, dan schijnt het geelachtig. Zeer duidelijk kan men deze verschijnselen maken door den volgenden toestel. Twee stukken bordpapier worden loodregt op elkander geplaatst; het vertikale wordt met wit papier beplakt, dat in het midden eene zwarte vlek heeft van ongeveer $1\frac{1}{2}$ duim middellijn; het horizontale bordpapier wordt met zwart papier beplakt, waarop in 't midden een rond schijfje wit papier is geplakt van gelijke grootte, als de zwarte op het andere bordpapier. Tusschen beide bevindt zich een gekleurd glas, in zoodanigen stand, dat het met elk een hoek van 45° maakt. Houdt men nu het oog zoodanig, dat het beeld, hetwelk de onderste oppervlakte van het glas door terugkaatsing van de op het onderste bordpapier gemaakte witte vlek geeft, juist voor de zwarte vlek op het witte bordpapier gezien wordt, dan schijnt deze gekleurd en wel in de complementaire kleur van die, waarin men den witten grond door het gekleurde glas ziet.

Beschouwt men gedurende eenige oogenblikken eene gekleurde schijf op een witten grond, dan bemerkt men weldra daarom een lichtkrans, welke de complementaire kleur van die der schijf heeft. Is de schijf wit en de grond gekleurd, dan neemt men aan den buitensten rand der schijf een dergelijken lichtkrans waar. Aan zoodanige indrukken schijnen ook de gekleurde schaduwen te moeten worden toegeschreven, die men soms waarneemt; bij het ondergaan van de zon, wanneer het licht meer geelachtig gekleurd is, nemen de schaduwen eene blaauwachtige kleur aan.

Plaatst men verschillende kleuren naast elkander, dan oefent elke een zekeren invloed uit op den indruk, door de naastbijgelegene kleur op het oog gemaakt. Chevreuil (1839) heeft aangaande dezen invloed verschillende proeven genomen, die hem tot het besluit geleid hebben, dat wanneer twee kleuren naast elkander geplaatst zijn, elke van haar gewijzigd wordt door de vermenging met de complementaire kleur van de naastgelegene. Zijn het complementaire kleuren, dan schijnen beide dientengevolge helderder en levendiger te zijn; bevindt de eene zich in de nabijheid van een witten of zwarten grond, dan neemt men een krans van de complementaire kleur waar.

426. **Onzigtbare lichtstralen.** — Wij hebben hiervóór (412) de opmerking gemaakt, dat er buiten de violette stralen van het prisma zich nog andere stralen bevinden, die men met het oog doorgaans niet waarneemt, maar welke men alleen onder bijzondere omstandigheden kan bemerken, en die zich ook, zooals wij later (434) zien zullen, door andere werkingen laten erkennen. Welke de oorzaak is, dat die stralen door het oog niet worden waargenomen, laat zich moeijelijk verklaren. Volgens Donders mist het oog de eigenschap om deze ultra-violette stralen op te slorpen; het is niet onwaarschijnlijk, dat de ether-trillingen voor dit licht te snel zijn om op het netvlies eenen indruk te weeg te kunnen brengen; wij zullen namelijk later zien, dat de trillingen van den licht-ether in snelheid toenemen, wanneer men van het roode tot het violette uiteinde van het spectrum overgaat. Hieruit mag men echter nog niet besluiten, dat er geen oog is, dat voor deze indrukken gevoelig is; het is zeer wel mogelijk, dat andere schepsels daar beginnen te zien, waar wij geene kleur of licht meer kunnen onderscheiden, terwijl hun gezigtsorgaan niet vatbaar is voor sommige indrukken, welke door het onze worden opgenomen.

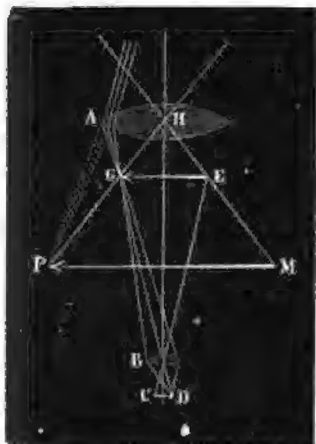
427. **Enkelvoudig mikroskoop.** — Het menschelijk oog is, wat ruimte en afstand aangaat, zelfs in den gezonden toestand, aan zekere grenzen gebonden. Sommige voorwerpen kan men wegens hunne kleinheid niet onderscheiden; andere kan men om hunnen grooten afstand niet duidelijk waarnemen. Door eene vernuftige verbinding van lenzen en spiegels is men er in geslaagd om werktuigen zamen te stellen, welke het oog in deze beide gevallen te hulp komen; die welke dienen om kleine voorwerpen duidelijk te maken, noemt men *mikroskopen;* die welke gebruikt worden om verafgelegene voorwerpen als 't ware digter bij ons te brengen, worden *teleskopen* of *verrekijkers* genoemd. Beide zijn het eerst door Nederlanders uitgedacht; het mikroskoop door Johannes en Zacharias Janssen omstreeks 1590; de verrekijker door Lippershey in 1608.

Het eenvoudigste middel om een voorwerp vergroot te zien is eene enkele convergerende lens, waarvan wij reeds hiervóór (400) de eigenschap hebben leeren kennen van een vergroot virtueel beeld van een daarachter geplaatst voorwerp te geven. Aan zoodanige lens geeft men den naam van *enkelvoudige mikroskoop* of *loep*. De maat der vergrooting kan men gemakkelijk bepalen, wanneer men de afstanden kent, waarop zoowel het voorwerp als het beeld van de lens verwijderd zijn, daar deze blijkbaar door de verhouding $\frac{p'}{p}$ tusschen die beide afstanden wordt

aangeduid. Men kan die echter ook bepalen, wanneer men alleen den afstand p van het voorwerp zelf tot de lens, alsmede haren hoofdbrandpuntsafstand a kent. De formule (γ) op bladz. 594 geeft namelijk voor dit geval $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}$; daaruit volgt onmiddellijk, dat $\frac{p'}{p} = \frac{a}{a-p}$ moet zijn, welke laatstgemelde uitdrukking dus evenzeer de maat der vergrooting aanwijst.

428. **Zamengesteld mikroskoop.** — De vergrooting, die men door het enkelvoudig mikroskoop verkrijgen kan, is uit den aard der zaak niet aanzienlijk; alleen bij zeer convexe lenzen zoude zij dit kunnen zijn, maar daaraan zijn bezwaren van verschillenden aard verbonden, waarvan de afwijking wegens bolvormigheid het voornaamste is. Men bedient zich daarom bij voorkeur van de zoogenaamde *zamengestelde* mikroskopen, welke uit eene verbinding van twee of meer lenzen bestaan, zooals wij er reeds hiervóór bij de beschrijving van het zon-mikroskoop hebben aangetroffen. Zij zijn echter van dien toestel in zooverre onderscheiden, dat terwijl bij het zon-mikroskoop een werkelijk beeld gevormd wordt, bij de zamengestelde mikroskopen slechts virtuele beelden ontstaan, die men dus alleen kan waarnemen, wanneer men door de lenzen ziet.

Fig. 415.

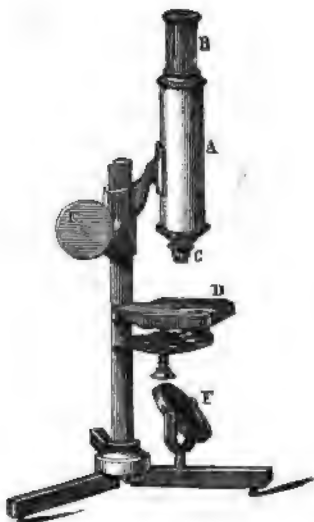


De zamenstelling van het zamengestelde mikroskoop is in beginsel voorgesteld in fig. 415. Het bestaat uit twee biconvexe lenzen A en B; men ziet door de eerste A en plaatst het voorwerp achter B; daarom wordt A het *oculair* of *oogglas* en B het *objectief* of *voorwerpglas* genoemd. Is het voorwerp in CD geplaatst, zoodanig dat het een weinig verder dan het hoofdbrandpunt van de objectief-lens verwijderd is, dan zal het op aanzienlijken afstand boven die lens een beeld EG vormen. De stralen gaan echter verder en vallen op het oogglas, waar zij weder gebroken worden, zooals in de figuur is aangewezen. Een boven A geplaatst oog ziet dan het beeld niet bij GE maar bij PM; hoe de plaats en de grootte van dit beeld bepaald wordt, blijkt aanstonds

uit hetgeen hiervóór omtrent de breking door biconvexe lenzen is gezegd. Door de zamenwerking van de lenzen A en B neemt men dus een aanmerkelijk vergroot en omgekeerd beeld PM van het voorwerp DC waar, terwijl de werking eigenlijk daarin bestaat, dat men door het oogglas, als door een gewoon enkelvoudig mikroskoop, het door het objectief-glas gevormde beeld aanschouwt.

Men geeft aan het mikroskoop verschillende inrigtingen. De buis, waarin zich de beide lenzen bevinden, is dan eens horizontaal, dan eens vertikaal geplaatst; bij sommige kan zij ook in eenen schuinen stand geplaatst worden. Doorgaans heeft het zamengestelde mikroskoop eene inrigting, zooals in fig. 416 is afgebeeld. A is eene koperen buis, waarin van boven bij B het oculair is ingeschoven, in dier voege, dat het hooger en lager kan gesteld worden, naar gelang van het oog van den waarnemer; onderaan bij C wordt het objectief aangeschroefd. Het voorwerp, dat men wil aanschouwen, wordt op het horizontale plaatje D gelegd, waarbij de buis BAC door middel van den knop E digterbij kan gebragt worden; het voorwerp zelf wordt op een glaasje gelegd, of tusschen twee glaasjes ingesloten. Ten einde het behoorlijk te verlichten wordt de holle spiegel F zoo gesteld, dat de daardoor teruggekaatste convergerende lichtstralen juist op het voorwerp vallen. Is het ondoorschijnend, dan moet het van boven verlicht worden; te dien einde bevindt zich aan het plaatje D doorgaans eene lens, waardoor de lichtstralen convergerend op het voorwerp gebragt worden.

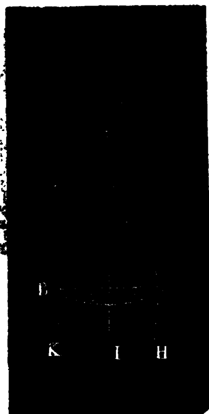
Fig. 416.



429. Achromatische oogglazen. — De lenzen, zooals wij die bij de beschrijving van het zamengestelde mikroskoop ondersteld hebben, lijden aan een groot gebrek, namelijk dat de afwijking wegens bolvormigheid en de kleuring der voorwerpen daarbij zeer aanzienlijk zijn. Men moet ze daarom, zoo men zuivere beelden verlangt, door achromatische lenzen vervangen, althans het objectief-glas; voor het oogglas neemt men doorgaans eene andere zamenstelling aan, die wij kortelijk zullen beschrijven.

Het zoogenaamde achromatische oculair van Campani, dat meestal bij mikroskopen gebruikt wordt, bestaat uit twee plat-bolvormige lenzen A en B (Fig. 417), doorgaans van crown-glas vervaardigd. De onderste lens B bevindt zich op zoodanige plaats, dat zij de stralen van het objectief-glas reeds opvangt, voor dat zich nog een beeld gevormd heeft. Zij CD de plaats, waar zich dat beeld zou vormen, wanneer de lens B zich niet daar bevindt, dan zullen de stralen, die van het objectief-glas komen, door B zoodanig gebroken worden, dat het beeld niet bij CD maar bij EG gevormd wordt. Het is dit beeld, dat door de lens A wordt waargenomen. De lens B heeft dus gediend om de stralen van het objectief-glas meer bij elkander te brengen en er eene andere rigting aan te geven; het wordt daarom veelal het *collectief-glas* genoemd; zijne werking behoort dus eigenlijk meer bij die van het objectief-glas, dan bij die van het oogglas. Ten einde de afwijking wegens bolvormigheid te voorkomen, bevindt zich doorgaans tusschen de glazen A en B, die beide in een zelfde koperen buisje bevestigd zijn, een diaphragma, waardoor de stralen, die op het digter bij den rand gelegene gedeelte der lens A zouden vallen, worden tegengehouden.

Fig. 417.



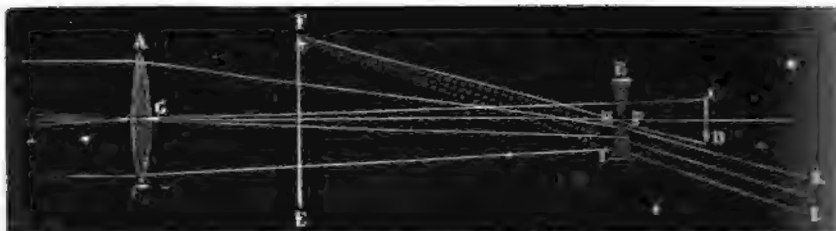
Ramsden heeft een ander zamengesteld oogglas uitgedacht, dat uit twee gelijke plat-bolvormige lenzen bestaat, die met de bolle zijde naar elkander toegekeerd zijn. Het door het objectief-glas gevormde beeld is daar beneden de onderste lens van het zamengestelde oogglas gelegen, en de beide lenzen van dat glas werken als een gewoon vergrootglas. Het oogglas van Ramsden wordt echter bij mikroskopen slechts zelden gebruikt.

430. **Hollandsche kijker of kijker van Galilei.** — Wij hebben zoo even reeds medegedeeld, dat men de eerste uitvinding van den verrekijker verschuldigd is aan eenen Nederlander; daarom draagt de kijker, op die eerst uitgedachte wijze zamengesteld, doorgaans den naam van *Hollandsche kijker*. Daar echter omstreeks dienzelfden tijd ook Galilei zoodanige kijkers heeft zamengesteld, worden zij ook dikwijls naar hem *kijkers van Galilei* genoemd.

Deze verrekijker bestaat, even als het mikroskoop, uit een objectief-glas en een oogglas. Het objectief-glas is eene biconvexe lens van grooten brandpuntsafstand; het oogglas daarentegen is eene biconcave lens, zoowals in fig. 418 is afgebeeld. Door het objectief-glas A zoude ergens in CD een omge-

keerd beeld van een verwijderd voorwerp gevormd worden, wanneer zich de lens B niet in den weg van de door A gebrokene stralen bevindt. Door B worden de stralen GH en GI echter andermaal gebroken, en divergeren volgens HK en IL; er wordt dus geen wezenlijk, maar een virtueel en niet omgekeerd beeld EF gevormd, dat men zal waarnemen, wanneer men het oog voor de lens B plaatst.

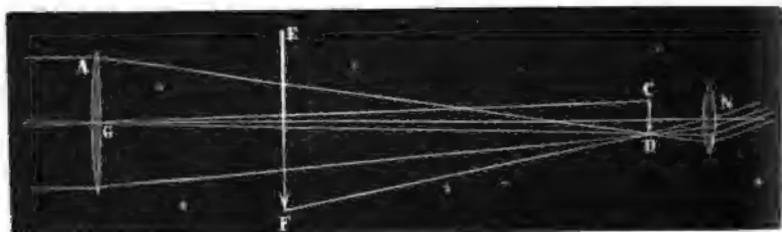
Fig. 418.



De vergrooting kan gemakkelijk bepaald worden, wanneer men slechts nagaat hoeveel maal de hoek FPE, waaronder men het beeld ziet, grooter is dan de hoek, waaronder men het voorwerp zelf ziet; doorgaans bedraagt bij deze soort van kijkers de vergrooting niet meer dan 2 of 3. Zij hebben echter het voordeel van zeer kort en daardoor gemakkelijk in het gebruik te zijn, en de voorwerpen niet om te keeren. De zoogenaamde tooneelkijkers zijn op deze wijze zamengesteld.

431. **Astronomische verrekijker.** — Tot sterrekundige waarnemingen maakt men gebruik van eene soort van verrekijkers, die anders zijn ingerigt dan de zoo even beschrevene. De zoogenaamde astronomische kijker bestaat, even als het zamengesteld mikroskoop, uit twee convergerende lenzen. Zijne zamenstelling is in fig. 419 voorgesteld. A is de objectief-lens, B het

Fig. 419.



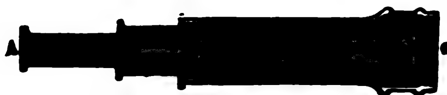
oogglas. Het door A gevormde beeld vormt zich tusschen de beide lenzen bij CD, en wordt door de lens B waargenomen, die dus hier de werking doet van een vergrootglas, zoodat men het beeld waarneemt alsof het zich bij EF bevond. De rigting der lichtstralen, zooals die bij deze kijkers plaats heeft, is in onze afbeelding voorgesteld en behoeft geene nadere verklaring. De vergrooting wordt hier, even als bij den hollandschen kijker, aangeduid door de verhouding tusschen de hoeken, waaronder men het voorwerp zelf en zijn beeld EF ziet. Die verhouding is dezelfde als die tusschen de hoeken CGD en EHF of tusschen de hoofdbrandpunts-afstanden van de beide lenzen.

De omstandigheid, dat bij den hollandschen kijker het door het objectiefglas gevormde beeld buiten het oogglas valt, terwijl het bij den astronomischen verrekijker tusschen de twee lenzen gelegen is, maakt dat de afstand der lenzen en dus ook de lengte van den kijker in het laatste geval veel aanzienlijker moet zijn; de afstand der lenzen wordt namelijk, zooals men ligtelijk uit fig. 418 en fig. 419 kan afleiden, in het eerste geval door het verschil, in het tweede door de som der brandpunts-afstanden uitgedrukt.

De inrigting van de astronomische kijkers is zeer eenvoudig; zij bestaan uit eene koperen buis, in wier eene uiteinde het objectief-glas bevestigd is; in het andere uiteinde bevindt zich eene naauwere buis, die in de eerste kan ingeschoven worden, en waarin zich het oogglas bevindt. Het geheel rust ongeveer in zijn midden op een koperen voet, en kan om een scharnier draaijen, zoodat de buis naar verschillende kanten en naar hooger en lager gelegene punten van den hemel kan gerigt worden. In plaats van met een enkelvoudig oogglas is de kijker doorgaans, wanneer men althans een duidelijk beeld wil waarnemen, met een achromatisch oogglas voorzien, zooals wij hiervóór (429) beschreven hebben. Bij goede kijkers is ook het objectief-glas eene achromatische lens, zamengesteld zooals hiervóór (413) verklaard is.

Het door den astronomischen kijker gevormde beeld is omgekeerd; daarom is hij voor waarneming van aardsche voorwerpen niet geschikt. Om dit te verhelpen maakt men gebruik van een oculair, dat uit vier bolvormige lenzen is zamengesteld en door Dollond is uitgedacht. Die vier lenzen vormen als 't ware een zamengesteld mikroskoop, waardoor men het beeld, dat door het objectief-glas omgekeerd is, andermaal omgekeerd, dus weder in denzelfden stand als het voorwerp zelf, waarneemt. De inrigting van den aardschen verrekijker is voorgesteld in fig. 420, waarin de vier lenzen A, B, C en D te zamen het oculair vormen, terwijl O de objectief-lens is. Tot meerder gemak bij het gebruik bestaan die kijkers niet uit eene lange buis, maar uit meerdere buizen, die in elkander schuiven.

Fig. 420.

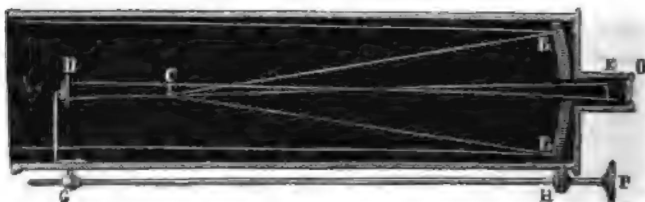


De vergrooting van een kijker kan men proefondervindelijk gemakkelijk bepalen, door hem naar eene vertikaal geplaatste verdeelde lat te rigten, en dan met het eene oog door den kijker, met het andere onmiddellijk naar de verdeelingen te zien. Men zal dan zonder moeite kunnen bepalen, hoeveel verdeelingen van de met het bloote oog beschouwde lat overeenkomen met ééne verdeeling van het vergroote beeld; dit getal wijst dan klaarblijkelijk de maat der vergrooting aan.

432. **Spiegel-teleskopen.** — De verrekijkers zijn eerst van wezenlijk praktisch nut bij sterrekundige waarnemingen geworden na de uitvinding der achromatische objectief-lenzen en der zamengestelde ooglazen. Wegens de ongeschiktheid van de kijkers voor zoodanige waarnemingen bediende men zich in vroegeren tijd van zoogenaamde *spiegel-teleskopen*, die evenwel ook thans nog in gebruik zijn. Zij zijn daarin van de verrekijkers onderscheiden, dat het beeld hier niet door breking door een objectief-glas gevormd wordt, maar door terugkaatsing tegen de oppervlakte van een hollen spiegel. Wij zullen hier niet alle verschillende inrigtingen beschrijven, die men aan de spiegelteleskopen gegeven heeft, maar bepalen ons tot dien van Gregory (1650), dien men nog het meest aantreft.

Deze teleskoop bestaat uit een koperen cilindrischen koker, die aan het uiteinde A (Fig. 421) geheel open is. Aan het andere uiteinde bevindt zich een holle

Fig. 421.



spiegel BB, die in het midden doorboord is. De van een verafgelegen voorwerp op dien spiegel invallende lichtstralen zullen bij C een omgekeerd beeld

vormen. Bij D bevindt zich een klein hol spiegeltje, waarop dit beeld andermaal wordt teruggekaatst, zoodat zich bij E een regtstaand beeld van het voorwerp vormt. Dit beeld wordt door een oogglas O waargenomen, zoodat men met zoodanig werktuig een regtstaand beeld van het voorwerp waarneemt. Men zal echter inzien, dat het enkelvoudig oogglas ook kan vervangen worden door een zamengesteld, zooals wij boven (429) beschreven hebben. Daar de plaats van het beeld C afhankelijk is van den afstand van het voorwerp, moet men den spiegel D kunnen verplaatsen; dit geschiedt door middel van eene schroef GH, die door den knop P wordt rondgedraaid. De geheele koker rust op een koperen voet en kan even als de verrekijker in verschillende standen geplaatst worden.

De voornaamste zwarigheid bij de vervaardiging van groote teleskopen is gelegen in de moeijelijkheid om de oppervlakte van den metalen spiegel zuiver te maken. Is die oppervlakte bolvormig, dan verhindert de spherische aberratie het ontstaan van een duidelijk beeld. Bij parabolische spiegels is dit het geval niet, maar die zijn moeijelijk te vervaardigen. In de laatste jaren is men op het denkbeeld gekomen, om in plaats van metalen spiegels glazen spiegels te vervaardigen, die men op scheikundigen weg verzilvert. Foucault heeft zoodanigen parabolischen spiegel vervaardigd van eene el middellijn, welke tot dusverre uitmuntende uitkomsten gegeven heeft.

F. SCHEIKUNDIGE WERKING VAN HET LICHT.

433. **Invloed van het licht op scheikundige verbindingen en ontledingen.** — Worden in het donker bereid chloorgas en waterstofgas in eene zelfde flesch gedaan en op eene donkere plaats gezet, dan verbinden zij zich niet met elkander; plaatst men echter de flesch in het daglicht, dan geschiedt de verbinding langzaam, in het zonlicht zelfs schielijk met eene ontploffing. Chloorwater, dat is eene oplossing van chloorgas in water, blijft in het donker langen tijd onveranderd; op eene lichte plaats verandert het in chloorwaterstofzuur ten gevolge van eene ontleding van het water, dat waterstof aan het chloorgas afstaat, terwijl zuurstofgas ontwijkt. Chloorzilver is een wit poeder, wanneer men het bereidt door bij de oplossing van een zilverzout eene oplossing van keukenzout of zoutzuur te voegen; laat men het in het licht staan, dan wordt het paars en zelfs zwart, tengevolge van eene ontleding in metalliek zilver en chloor. Deze verschijnselen en nog vele andere toonen dui-

delijk aan, dat het licht scheikundige verbindingen of ontledingen kan te weeg brengen, en dat dus de lichtstralen eene scheikundige werking kunnen uitoefenen.

Vele verschijnselen in het dagelijksch leven moeten eveneens alleen aan de scheikundige werking van het licht worden toegeschreven. Het bleeken van linnen en andere stoffen is alleen het gevolg van eene onder den invloed van het licht plaats hebbende verbinding van sommige daarin aanwezige stoffen met de zuurstof van de lucht. De planten zijn hare groene kleur alleen aan het licht verschuldigd; plaatst men eene plant in een kelder of op eene andere donkere plaats, dan groeit zij minder welig op en de bladeren hebben eene bleeke kleur. Eene merkwaardige werking van het licht nemen wij ook waar bij planten, die in eene kamer bij een venster geplaatst zijn; zij groeijen altijd naar den kant heen van waar het licht komt.

434. **Ongelijke scheikundige werking bij lichtstralen van verschillende kleur.** — De scheikundige werking van het licht is echter niet voor alle stralen dezelfde; dit kan aanstonds blijken door de volgende proef. Laat men in eene kamer door een rood glas licht vallen op een met chloorzilver doortrokken papier (1), dan wordt het niet of althans bijna niet gekleurd; laat men daarentegen blaauw of paars licht er op vallen, dan zijn weinige oogenblikken voldoende om het eene zwarte kleur te doen krijgen. Laat men op zoodanig papier het door een prisma gevormde zonnespectrum vallen, dan bemerkt men, dat aan het violette uiteinde van het prisma de werking van het licht de sterkste is, terwijl zij afneemt naar het andere uiteinde toe. Bij eene naauwkeurige beschouwing neemt men voorts waar, dat de scheikundige werking zich nog veel verder uitstrekt dan het violet, en dat dus de zoögenaamde ultra-violette of onzigtbare stralen zich vooral door eene sterke scheikundige werking onderscheiden. Concentreert men door eene lens de roode, oranje en gele stralen en laat men deze op het bereide papier vallen, dan neemt men zelfs na langdurige inwerking bijna geene kleuring waar; worden de overige stralen van het groen tot het ultra-violet toe door eene tweede lens opgevangen en op één punt geconcentreerd, dan wordt door deze

(1) Men kan dit het gemakkelijkst vervaardigen door gewoon doch zeer glad papier eerst eenige minuten te leggen in eene oplossing van chloorammonium (salmiak) en het daarna te droogen. Dit papier wordt vervolgens eenige oogenblikken gedompeld in of gelegd op eene oplossing van salpeterzuur zilveroxyd, en daarna gedroogd en tusschen zwart papier op eene donkere plaats bewaard. Door deze bewerking, die in een donker of slechts door eene kaars verlicht vertrek geschieden mag, wordt het chloorzilver in het papier zelf gevormd.

stralen, hoewel de lichtsterkte aanmerkelijk geringer is dan die van de andere, het papier in weinige minuten zwart. Vergelijkt men deze eigenschap met die van de fluorescentie (411), dan volgt er uit, dat die stralen, welke in sommige stoffen de fluorescentie te weeg brengen, zich ook door hunne scheikundige werking onderscheiden.

435. **Lichtbeelden, daguerreotypie, photografie.** — De eigenschap van het licht om chloorzilver te kleuren deed reeds voorlang de begeerte ontstaan om daarvan gebruik te maken om blijvende beelden van de voorwerpen te verkrijgen. De grootste zwarigheid bestond niet alleen daarin om die beelden te doen ontstaan, maar vooral om ze te doen blijven bestaan, daar het gedeeltelijk gekleurde met chloorzilver doortrokken papier onder den invloed van het licht weldra geheel zwart werd. De eerste proefnemingen, door Wedgwood en later door Niepce in 't werk gesteld, leidden tot geene gunstige uitkomsten; eerst in het jaar 1839 gelukte het Daguerre blijvende lichtbeelden te vervaardigen, die naar hem *daguerreotypen* genoemd werden.

De wijze, waarop Daguerre te werk ging, is de volgende. Men neemt eene verzilverde koperen plaat, die na behoorlijk gepolijst te zijn boven een bakje gelegd wordt, waarin op de eene of andere wijze dampen van jodium ontwikkeld worden. Deze jodium-dampen verbinden zich met het zilver en vormen eene goudgele of violette laag van jodium-zilver. Deze bewerking moet in een donker vertrek geschieden, daar dit jodium-zilver zeer gevoelig is voor de werking van het licht. De aldus bereide plaat wordt vervolgens in eene bepaaldelijk voor dit doel ingerigte camera obscura geplaatst, juist op dezelfde plaats, waar zich anders het scherm van mat glas bevindt, zoodat het omgekeerde en verkleinde beeld van de voorwerpen, waarnaar de toestel gekeerd is, juist op die plaat valt. Na haar gedurende korteren of langeren tijd daaraan te hebben blootgesteld, wordt zij er uit genomen. Men bemerkt er dan nog niets aan; wordt zij echter vervolgens blootgesteld aan den damp van kwikzilver, dan treedt het beeld te voorschijn. Daar waar de helderste gedeelten van het beeld op de plaat vielen, heeft eene scheikundige werking van het licht op het jodium-zilver plaats gehad, waardoor zij de eigenschap verkregen hebben om kwikzilver-dampen te kunnen condenseren. Op die plaatsen dus slaat het kwikzilver metaalachtig neêr, hetwelk niet of in mindere mate geschiedt op die plaatsen, waar de niet of minder verlichte gedeelten van het beeld gewerkt hebben. Bragt men de plaat in dezen toestand aan het daglicht, dan zoude het beeld weldra weder verdwijnen, daarom moet het eerst nog bestendig gemaakt of *gefixeerd* wor-

den. Dit geschiedt door het eenige oogenblikken te leggen in eene oplossing van onderzwaveligzure soda, waardoor de dunne laag jodium-zilver wordt opgelost, zoodat alleen het zilver en kwikzilver aan de oppervlakte der plaat blijven, op welke het licht nu geene verdere werking kan uitoefenen. Laat men het daglicht nu schuins op de blinkende plaat vallen, dan neemt men een duidelijk beeld van het voorwerp waar, even als in de camera obscura, doch zonder kleuren.

Sedert de uitvinding van Daguerre heeft men getracht op velerlei wijzen de vervaardiging van lichtbeelden te verbeteren. Weldra keerde men ook tot de vroegere proefnemingen terug om door middel van chloorzilver lichtbeelden op papier te verkrijgen, en ditmaal met betere uitkomsten. De eerste, die in dit opzigt mogt slagen, was Talbot; later is zijne methode, die doorgaans meer bepaald *photografie* genoemd wordt, hoewel deze naam evenzeer voor de vervaardiging van allerlei soorten van lichtbeelden gelden kan, veel verbeterd. Wij zullen daarvan in korte woorden eene beschrijving geven.

Het beginsel van deze methode is daarin gelegen, dat men niet onmiddellijk een juist beeld van het voorwerp op papier of op eene plaat vervaardigt, maar dat men eerst een zoogenaamd *negatief beeld* maakt, dat is een beeld, waarin de helder verlichte gedeelten van het voorwerp zwart, de in de schaduw liggende daarentegen weinig of in 't geheel niet gekleurd zijn. Dit beeld wordt op papier of op glas vervaardigd. Wil men het op papier doen ontstaan, dan moet dit papier eerst eene bewerking ondergaan, waardoor het gevoelig wordt gemaakt voor den indruk van het licht; hoe dit geschiedt meenen wij hier in 't midden te mogen laten; het zij voldoende op te merken, dat die bereiding hoofdzakelijk daarin bestaat, dat het met jodium-zilver doortrokken wordt. Daarna wordt het tusschen twee glazen platen aan de werking van het licht in de donkere kamer blootgesteld; nadat dit eenige oogenblikken geduurd heeft, wordt het er uitgenomen; men bemerkt er dan nog niets aan, maar wordt het nu gelegd in eene oplossing van galnotenzuur (acidum gallicum), dan ziet men weldra het beeld te voorschijn komen, dat nu niet alleen aan de oppervlakte van het papier gevormd is, maar zich als 't ware in het geheel met jodium-zilver doortrokken papier gevormd heeft. Daarna wordt het in eene oplossing van onderzwaveligzure soda gelegd, waardoor het overgeblevene jodium-zilver wordt opgelost, zoodat het zilver alleen op de gekleurde plaatsen blijft.

Om nu een duidelijk beeld van het voorwerp, een zoogenaamd *positief beeld*, te verkrijgen, plaatst men het negatieve beeld en een met chloorzilver door-

trokken op de hiervóór beschrevene wijze bereid papier tegen elkander tusschen twee glazen platen, daarbij zorgdragende dat de achterkant van dit papier aan de werking van het licht onttrokken is. Stelt men den anderen kant nu bloot aan de werking van het daglicht, dan wordt door het negatief papier licht doorgelaten op die plaatsen, waar het niet gekleurd is, terwijl de gedeelten, die door de eerste bewerking meer of min zwart gekleurd zijn, geen of slechts weinig licht doorlaten. Aldus ontstaat op het met chloorzilver doortrokken papier een duidelijk beeld van het voorwerp, waarop licht en donker op dezelfde wijze verdeeld zijn als bij het beeld in de donkere kamer. Daar dit positieve beeld echter, zoo het aan het licht blootgesteld bleef, weldra geheel zwart zoude worden, moet het nog gefixeerd worden, hetgeen geschiedt in eene oplossing van onderzwaveligzure soda, waarin het in het papier aanwezige en nog ongekleurde chloorzilver wordt opgelost. Men heeft dan een duidelijk en blijvend beeld van het voorwerp, dat het voordeel heeft van juist zoo te zijn als het voorwerp zelf, en niet, zooals bij de daguerreotypen het geval is, omgekeerd.

Tegenwoordig maakt men het negatieve beeld doorgaans op glas. Te dien einde bedekt men eene glazen plaat met collodium, eene oplossing van schietkatoen in zwavelether en alcohol, waarin men een weinig jodkalium heeft opgelost. Deze plaat wordt eenige oogenblikken gelegd in een bad, waarin zich eene oplossing van salpeterzuur zilveroxyd bevindt; daardoor vormt zich in de collodium-laag wit jodium-zilver. Nog vochtig wordt de plaat in de donkere kamer geplaatst, waar weinige seconden voor de werking van het licht voldoende zijn. Daarna schenkt men op de plaat eene oplossing van een sterk reducerend zuur, pyrogalluszuur (acidum pyrogallicum) genaamd, of ook wel eene oplossing van zwavelzuur ijzeroxydul (ijzervitriool), waardoor aanstonds het negatieve beeld te voorschijn komt. Het overtollige jodiumzilver wordt daarna door eene oplossing van onderzwaveligzure soda of van cyankalium weggenomen; de plaat wordt met zuiver water voorzigtig afgespoeld en daarna gedroogd. Het positieve beeld wordt dan op gelijke wijze als met een op papier gevormd negatief beeld verkregen.

In plaats van collodium maakt men ook wel van eiwit gebruik. Daaraan is het voordeel verbonden, dat men de platen vooraf kan gereed maken, daar men deze droog, die met collodium daarentegen bij voorkeur vochtig gebruikt. Het beeld wordt echter op eene collodiumplaat veel schielijker gevormd dan op eene plaat met eiwit.

De velerlei bijzondere bewerkingen, welke men tot verfraaijing der lichtbeelden aanwendt, alsook de verschillende toepassingen die men van de

photografie gemaakt heeft, laten wij hier onvermeld, daar zij alleen van belang zijn voor hen, die zich meer in 't bijzonder met dezen belangrijken tak van de natuurkunde willen bezig houden.

G. INTERFERENTIE EN BUIGING VAN HET LICHT.

436. **Interferentie van lichtstralen; proef van Fresnel.** — Wij hebben bij het begin van dit hoofdstuk reeds gewag gemaakt van de twee verschillende theorien, die men heeft uitgedacht om eene verklaring van de lichtverschijnselen te geven, en daarbij de opmerking gemaakt, dat de kennis van sommige dier verschijnselen den strijd tusschen de emanatie-theorie en de undulatie- of trillings-theorie ten voordeele van laatstgenoemde had beslist. Wij zullen nu die verschijnselen, onder den naam van *interferentie* van het licht bekend, leeren kennen, en wel op die wijze, zooals zij door de proef van Fresnel met twee spiegels duidelijk worden gemaakt.

Door eene spleet in het blind van een donker vertrek laat men door middel van een heliostaat in horizontale rigting een lichtbundel vallen op eene convergerende lens, bij voorkeur op eene half cilindrische, zoodat de lichtstralen niet naar boven en naar beneden, maar alleen zijdwaarts divergerende daaruit treden. De aldus divergerende lichtstralen laat men vallen op twee vlakke spiegeltjes, die eenen zeer stompen hoek met elkander maken; plaatst men dan op eenigen afstand een scherm, waarop de door die spiegeltjes teruggekaatste lichtstralen vallen, dan neemt men daar, zoo het licht wit zonnelicht is, gekleurde strepen waar, doch bij enkelvoudig licht elkander afwisselende donkere en lichte strepen, die des te breeder zijn, naarmate de hoek van de spiegeltjes minder van 180° verschilt. Daar de strepen echter meestal zeer fijn zijn, worden zij niet met het bloote oog, maar met een vergrootglas of enkelvoudig mikroskoop waargenomen; in dat geval is er geen scherm noodig om ze op te vangen, maar laat men het beeld zich eenvoudig achter het vergrootglas vormen, waardoor men het dan beschouwt. Fig. 422 stelt den weg voor, dien de lichtstralen afleggen; AB en BC zijn de spiegels, wel te verstaan in doorsnede, waarop de van het punt D uitgaande divergerende lichtstralen worden teruggekaatst, en wel in dier voege, dat het juist is, alsof zij van de punten E en F kwamen, die even ver achter de spiegels BC en AB gelegen zijn, als D er voor ligt. Die lichtstralen zullen elkander ontmoeten in de punten G, H, I, K, L, enz.; ligt het punt G op

gelijken afstand van E en F, dan neemt men daar eene heldere streep waar, ter weêrszijden bij H en I donkere strepen, daarnaast bij K en L weder lichte, en zoo verder.

437. Verklaring der interferentie van het licht door de trillings-theorie. — Wij hebben reeds gezegd (370), dat volgens de trillings-theorie alle deeltjes van den licht-ether trillen in eene rigting loodregt op die, waarin het zich voortplant. Deze trilling geschiedt zoodanig, dat de deeltjes, die zich in den toestand van rust alle in de regte lijn AB (Fig. 423) zouden bevinden, zich dan op de golflijn CDEFGH bevinden. Elk deeltje is in trilling tusschen zijne twee uiterste standen; dat in D trilt tusschen de punten D en D', en wel, even als bij de schommelingen van een slinger het geval is, in D en D' met eene snelheid, die gelijk aan nul is, terwijl de snelheid het grootste is, als het door de lijn AB gaat. De beweging van alle deeltjes heeft niet op hetzelfde oogenblik plaats, maar er is een zekere tijd noodig om de beweging voort te planten, zoodat het deeltje, dat zich in F bevindt, later in beweging geraakt dan dat in D, wanneer namelijk het licht in de rigting van A naar B wordt voortgeplant. Den afstand tusschen twee etherdeeltjes, zooals C en G of D en H, die zich in denzelfden trillingstoestand bevinden, noemt men eene golflengte. De deeltjes, die eene halve golflengte van elkander verwijderd zijn, zooals D en F, bevinden zich daarentegen in juist tegenovergestelde trillingstoestanden, zoodat de snelheden dier twee deeltjes wel even groot,

Fig. 422.

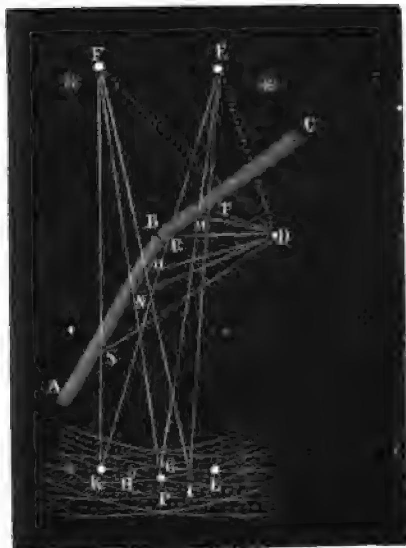


Fig. 423



maar juist tegenovergesteld in rigting zijn. Het is blijkbaar, dat hetzelfde het geval zal zijn met deeltjes, die $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{2}$, $\frac{7}{2}$ eener golflengte van elkander verwijderd zijn.

De sterkte van het licht hangt af van de intensiteit der trillingen, dat is van de grootte der afwijkingen van de deeltjes uit hunnen toestand van rust in de regte lijn AB. Op wiskundige gronden neemt men aan, dat de sterkte van het licht evenredig is aan de vierkanten van de intensiteit der trillingen. Tusschen de voortplantingssnelheid v van het licht, den duur t eener trilling en de golflengte λ, geldt eene gelijke betrekking als wij voor het geluid hebben opgegeven, zoodat wij ook hier de vergelijking $\lambda = vt$ hebben, of als n het aantal trillingen in ééne seconde voorstelt, zoodat $t = \frac{1}{n}$ kan gesteld worden, $\lambda = \frac{v}{n}$.

Past men deze theorie toe op de boven vermelde interferentie-verschijnselen, dan is de verklaring niet moeijelijk. Beschouwen wij namelijk de stralen, die in G, H, K enz. te zamen komen, dan kunnen wij die beschouwen, alsof zij van E en F uit waren gegaan. Beschrijft men uit E en F als middenpunten cirkels, dan zullen alle etherdeeltjes, welke zich op een zelfden cirkel bevinden, in denzelfden trillingstoestand verkeeren; is de afstand van twee op elkander volgende cirkels eene halve golflengte, dan verkeeren de etherdeeltjes in twee zoodanige cirkels op hetzelfde oogenblik juist in tegenovergestelden toestand. In het punt G, dat op gelijken afstand van E en F gelegen is, wordt het etherdeeltje te gelijk aangedaan door de lichtgolven die van E en F uitgaan, en wel door beide op dezelfde wijze. De werking wordt dus versterkt, de amplitude der trilling is dus grooter, en er heeft dus daar versterking van licht plaats. In het punt H daarentegen zijn de werkingen juist tegenovergesteld; de afstanden tot de punten E en F verschillen eene halve golflengte, zoodat het deeltje, dat ten gevolge van de van E uitgaande golf zich naar den eenen kant zoude trachten te begeven, door den van F uitgaanden golf met gelijke kracht in tegenovergestelde rigting gedreven wordt; het blijft dus in rust, en er wordt in H geen licht waargenomen. In K ontmoeten elkander twee cirkels, wier stralen eene geheele golflengte verschillen; daar moet dus versterking van licht plaats hebben; in het nog meer links gelegene ontmoetingspunt bedraagt het verschil der afstanden tot E en F $\frac{3}{2}$ eener golflengte, zoodat de beide op de etherdeeltjes werkende krachten elkander vernietigen, en er dus geen licht wordt waargenomen. Men zal ligt inzien, dat aan de andere zijde van G hetzelfde plaats heeft, en dat men dus, wanneer men de proef op de boven beschrevene wijze met enkelvoudig licht inrigt, elkander afwisselende lichte en donkere strepen moet waarnemen.

438. **Bepaling van de lengte der lichtgolven.** — De waarneming van de interferentien van het licht met den spiegel van Fresnel stelt ons in staat om de lengte der lichtgolven te berekenen, wanneer men de breedte van eene der lichte strepen alsmede den hoek, waaronder men de beelden in de beide spiegels ziet, gemeten heeft (1). Vergelijkt men echter

---

(1) Hoewel de meeste lezers wel niet in de gelegenheid zullen zijn de proeven betrekkelijk de lichtinterferentien te herhalen en naauwkeurige metingen te doen, zoo acht ik het nogtans niet ongepast hier in eenige bijzonderheden te treden aangaande de wijze, waarop de lengte van de lichtgolven uit de waarneming kan berekend worden.

De voornaamste zwarigheid bestaat in eene juiste bepaling van den hoek der beide spiegels van Fresnel. Zijn *pm* en *qm* (Fig. 424) de beide spiegels, *d* het lichtgevend punt, *c* het punt waar de teruggekaatste stralen *dac* en *dbc* elkander weder ontmoeten, δ de hoek van invalling *pad* op den spiegel *pm*, γ de hoek van invalling *qbc* op den spiegel *mq*, en α het supplement van den hoek *pmq*, dien de spiegels onderling maken. Uit de vierhoeken *damb* en *camb* volgt, dat $c - d = 2(\gamma - \delta)$; door *c* en *d* worden hier de hoeken *acb* en *adb* bedoeld. Verlengt men *bc* tot in *n*, dan leidt men, dewijl hoek $mnb = 180° - \delta - c$, uit den driehoek *mnb* af, dat $\gamma - \delta = c - \alpha$; substitueert men dit in de zoo even gevonden formule voor $c - d$, dan vindt men de eenvoudige formule $c + d = 2\alpha$.

Fig. 424.



De driehoeken *abc* en *abd* geven de verhouding $\frac{\sin c}{\sin d} = \frac{ad}{bc} \cdot \frac{\sin bac}{\sin abd}$. Daar echter de afstanden *am* en *bm* slechts zeer klein zijn in vergelijking van *dm* en *cm*, kan men zonder merkbare fout *ad* door *dm* en *bc* door *cm* vervangen. Ook de hoeken *bac* en *abd* verschillen slechts van elkander ter waarde van $\gamma - \delta$, zoodat deze hoeken en dus ook hunne sinussen gelijk gesteld mogen worden; daardoor wordt de formule $\sin c : \sin d = dm : cm$. Daar echter de hoeken *c* en *d* zeer klein zijn, dewijl hunne som gelijk is aan 2α, zoo kan men de sinussen door de hoeken zelven vervangen, zoodat men de eenvoudige evenredigheid $c : d = dm : cm$ verkrijgt.

Van deze formule kan men zich in de eerste plaats bedienen om den hoek der spiegels $\alpha = \frac{1}{2}(c + d)$ te berekenen. Te dien einde plaatse men de spiegels in vertikalen stand, en op een afstand van ongeveer 5 palm een theodoliet met horizontalen verdeelden cirkel. Eene op eenen afstand van 50 of 100 el geplaatste baak ziet men dan in de spiegels dubbel; door den kijker van den theodoliet eerst op het eene en dan op het andere beeld te rigten, kan men den hoek bepalen, dien de beide beelden in het oog maken. Die hoek is dus de hoek *c* van fig. 424. Daar de afstanden *cm* en *dm* eveneens bekend zijn, kan men *d* berekenen, dus ook $c + d$; de helft hiervan is de hoek α.

Is de hoek van de spiegels bekend, en heeft men de breedte der strepen gemeten, dan blijft nog de hoek MGN (Fig. 422) te bepalen; deze komt overeen met hoek *c* in fig. 424. Om dien te vinden mete men den afstand *cm* van het midden der spiegels tot het brandpunt van het mikroskoop, waarmede men de strepen heeft waargenomen en gemeten, alsmede den afstand *dm* van de spiegels tot het lichtgevend punt; beide laten zich gemakkelijk bepalen, wanneer de toestel slechts behoorlijk ingerigt is. Brengt men de evenre-

de breedte der strepen, wanneer men achtervolgens verschillend gekleurd licht op de spiegels laat vallen, dan bemerkt men, dat zij voor rood licht de breedste zijn, voor oranje minder breed, en zoo verder in dezelfde volgorde, waarin de kleuren in het spectrum voorkomen, zoodat zij voor violet licht de smalste zijn. Daaruit volgt dus, dat de lengte der lichtgolven voor de verschillende kleuren ook onderscheiden moet zijn, en wel voor violet de kleinste, voor rood de grootste. Kent men die lengte, dan kan men door middel van de formule $\lambda = \frac{v}{n}$ of $n = \frac{v}{\lambda}$, waarin $v = 310000$ kilometers is, het aantal trillingen in eene seconde voor de verschillende kleuren van het spectrum bepalen. In de volgende tabel zijn de uitkomsten van de waarnemingen van Fresnel bevat.

Kleuren en Fraunhofer'sche strepen in het spectrum.	Lengte der lichtgolven in strepen.	Aantal trillingen in eene seconde.
Streep B	0,000688	
Streep C	0,000656	
Rood	0,000620	500 000000 000000
Streep D	0,000589	
Oranje	0,000583	581 000000 000000
Geel	0,000551	565 000000 000000
Streep E	0,000526	
Groen	0,000512	605 000000 000000
Streep F	0,000484	
Blaauw	0,000475	653 000000 000000
Indigo	0,000449	690 000000 000000
Streep G	0,000429	
Violet	0,000423	733 000000 000000
Streep H	0,000393	

digheid dan onder den vorm $cm + dm : dm = d + c : c$, dan zal men daaruit c kunnen berekenen, dewijl $d + c$ $2a$ bekend is. De lengte van de lichtgolf zelve wordt vervolgens aldus gevonden; in figuur 422 is PG de halve lichtgolf $= \frac{1}{2}\lambda$, HG de halve middelste streep $= \frac{1}{2} b$, terwijl de driehoek HPG geeft PG = HG sin PHG. Daar nu echter blijkbaar hoek PHG = MGN, welke laatste dezelfde is als die, welken wij hiervóór door c hebben aangeduid, zoo heeft men $\lambda = b \sin c$.

Bij eenige proeven, die ik in 1846 met eenen uitmuntenden door Becker vervaardigden toestel te Groningen heb gedaan, bedroeg de hoek α, welke op de hiervóór beschrevene wijze berekend was, 7′27″. Verscheidene metingen van de breedte der strepen met verschillend gekleurd licht hebben mij voor de lengte der lichtgolven dezelfde uitkomsten gegeven als die hierboven vermeld zijn.

De hier vermelde strepen zijn de bovengemelde donkere strepen in het spectrum (417); de kleuren zijn die, welke door Fresnel gemiddelde kleuren (*rouge moyen*, *jaune moyen*, enz.) genoemd zijn.

439. **Verschijnselen van de buiging van het licht.** — Dergelijke verschijnselen als bij de terugkaatsing van het licht op twee spiegels, die eenen zeer stompen hoek met elkander maken, worden waargenomen, kan men ook nog in andere gevallen bemerken, en wel bepaaldelijk, wanneer een lichtstraal langs den scherpen kant van een of ander voorwerp strijkt of door eene kleine opening dringt. Laat men in een donker vertrek een lichtbundel vallen op eene convergerende lens en plaatst men daarachter, op eenen afstand grooter dan de brandpunts-afstand, een scherm met vrij scherpen kant, dan zal men bemerken, dat de afscheiding van de schaduw van dit scherm op eene muur of een wit scherm, dat zich op eenen afstand van een paar ellen bevindt, niet scherp is, maar dat er daar, waar men zoude meenen enkel schaduw te moeten zien, elkander afwisselende donkere en lichte strepen worden waargenomen. Het licht heeft zich dus niet zuiver regtlijnig voortgeplant, maar tegen den kant van het ondoorschijnende scherm eene buiging ondergaan. Laat men den door de lens doorgelaten lichtbundel vallen op een ondoorschijnend scherm, waarin men eene spleet gemaakt heeft, dan bemerkt men op het verder geplaatste witte scherm niet eene verlichte plek, zooals zij meetkundig zoude moeten zijn, maar eene reeks van elkander afwisselende gekleurde strepen. Hetzelfde is het geval wanneer men tusschen de lens en het achterste scherm een dun voorwerp, bijv. eene naald plaatst; in plaats van eene enkele donkere streep, zooals men zoude moeten waarnemen wanneer er geene buiging plaats had, ziet men dan op het scherm verscheidene gekleurde strepen met eene donkere streep in het midden. Gebruikt men in plaats van zonnelicht enkelvoudig gekleurd licht, dan zijn de strepen niet meer gekleurd met de onderscheidene kleuren van het spectrum, maar afwisselend donker en licht, even als zulks bij de interferentien het geval is.

Men kan zich nog op eene eenvoudiger wijze van deze verschijnselen overtuigen, door naar een van binnen zwart gemaakt horlogieglaasje of een dergelijken bolvormigen spiegel, waarop de zon schijnt, te zien door eene kaart, waarin men een klein gaatje geprikt heeft; men neemt dan in plaats van het kleine zonnebeeldje, dat men, regtstreeks naar het spiegeltje ziende, waar zou nemen, eene met gekleurde ringen omgeven lichte plek waar, zooals in fig. 425 is voorgesteld; maakt men in plaats van een rond gaatje eene spleet in het kaartpapier, dan neemt men verscheidene gekleurde strepen waar, die

evenwijdig zijn met de rigting van de spleet, zoowals in fig. 426 is afgebeeld. Plaatst men een gekleurd glas tusschen het spiegeltje en het kaartpapier, dan zijn de strepen afwisselend licht en donker; voor rood licht zijn zij verder van elkander verwijderd dan voor violet licht. Heeft men een kleinen verrekijker tot zijne beschikking, dan kan men de buigingsverschijnselen zeer duidelijk maken door voor het objectiefglas een kokertje aan te brengen, welks opening men met bladtin bekleed heeft, waarin men een klein gaatje heeft gesneden. Kijkt men dan door den kijker naar de eene of andere lichtbron, dan ziet men de strepen vergroot en dus duidelijker.

Fig. 425.



Fig. 426



De gedaante van de strepen, die men op deze wijze waarneemt, hangt af van den vorm en het getal van de in het ondoorschijnende scherm gemaakte openingen. Maakt men bijv. in het op den kijker bevestigde bladtin eene kleine opening in de gedaante van een parallelogram, dan is het alsof men twee elkander kruisende stelsels van strepen ziet. Heeft men in het bladtin twee ronde gaatjes gemaakt, op een afstand van een of twee millimeters, dan bemerkt men, even als door eene zoodanige opening, concentrische gekleurde cirkels, maar door zwarte strepen gesneden, die loodregt staan op de lijn, van het eene gaatje naar het andere getrokken, en zich zelfs in het middelste heldere gedeelte vertoonen. Zeer fraai zijn ook de buigingsverschijnselen die men waarneemt, als men op de boven aangewezene wijze ziet door een glaasje, waarop zeer digt naast elkander krassen met een diamant gemaakt zijn, of wanneer men stuifmeel op eene glazen plaat strooit en daardoor naar de vlam eener kaars of lamp ziet.

De verklaring dezer verschijnselen moet, even als die van de interferentien, gezocht worden in het zamenkomen van verschillende lichtgolven. Op het oogenblik, dat het licht loodregt valt op het scherm AD (Fig. 427), waarin eene spleet BC gemaakt is, verkeeren alle etherdeeltjes, die zich in die opening bevinden, in denzelfden trillingstoestand, daar zij alle als even ver van de lichtbron verwijderd kunnen beschouwd worden. Elk dier

Fig. 427.



etherdeeltjes plant zijne trillingen aan gene zijde van het scherm voort, en vormt het middenpunt van een spherischen golf; deze golven zullen dus tot interferentien kunnen aanleiding geven. Die, welke in het midden in regte rigting voortgaan, ondersteunen als 't ware elkander, en veroorzaken in het midden eene versterking van licht. Is echter een punt E zoodanig gelegen, dat de afstanden van E tot twee naast elkander gelegene etherdeeltjes C en E juist eene halve golflengte of een oneven aantal halve golflengten bedraagt, dan zal er, even als wij zulks voor de interferentien hebben aangetoond, vernietiging van licht, dus duisternis worden waargenomen. Men moet dus afwisselend lichte en donkere strepen verkrijgen, wier vorm afhankelijk is van de vorm van de opening BC. De zoo even vermelde omstandigheid, dat men bij twee openingen donkere strepen waarnemen kan in de middelste heldere plek, bewijst duidelijk, dat er ook interferentie en zelfs vernietiging van licht kan plaats hebben, waar men anders zoude meenen een sterker licht te moeten waarnemen.

440. **Kleuren van dunne platen; kringen van Newton.** — Wanneer men van een of ander doorzigtig ligchaam een zeer dun plaatje of laagje vervaardigt, dan neemt men daarin fraaije kleuren waar. Zeer duidelijk zijn die bij een zeepbel, die eerst ongekleurd is, maar naarmate hij dunner wordt, de verschillende kleuren van het spectrum vertoont. Eveneens neemt men die waar, wanneer men op de in rust zijnde oppervlakte van het water een druppel terpentijnolie laat vallen, die zich aanstonds daarover verspreidt en een zeer dun laagje vormt. Houdt men een stuk staal eenige oogenblikken in het vuur, dan bemerkt men ook aan zijne oppervlakte kleuren, die veroorzaakt worden door het dunne laagje oxyd, dat zich daar gevormd heeft In kristallen of groote stukken glas neemt men eveneens somtijds in spleten of barsten zoodanige kleuren waar, die dan veroorzaakt worden door het dunne laagje lucht, dat zich daartusschen bevindt. Newton, die zich vooral met deze verschijnselen heeft bezig gehouden, heeft de kleuren in eene dunne luchtlaag op de volgende wijze duidelijk gemaakt. Men neemt eene volkomen vlakke glazen plaat en legt daarop eene convexe lens met zeer grooten brandpunts-afstand; plaatst men die in het daglicht, zoodat het daarop teruggekaatste licht in ons oog geraakt, dan bemerkt men daar, waar de bolvormige oppervlakte het platte vlak raakt, eene zwarte vlek, en daaromheen gekleurde kringen; hun getal bedraagt doorgaans zeven of acht; wanneer men echter door een enkelvoudig gekleurd glas ziet, dan neemt men er veel meer waar, en wel afwisselend zwarte en enkelvoudig gekleurde. De kringen die men door een rood glas ziet, zijn verder van elkander verwijderd dan die,

welke men door een groen glas waarneemt; deze laatste wederom verder dan die, welke men in violet licht bemerkt. Houdt men de beide glazen tegen het licht, zoodat geen teruggekaatst maar enkel doorgelaten licht in het oog komt, dan neemt men ook kringen waar, doch de kleuren zijn dan de complementaire kleuren van de bij terugkaatsing waargenomene; in het midden bemerkt men dan geen zwarte plek, maar eene kleurlooze, waardoor het licht geheel onveranderd wordt doorgelaten. In enkelvoudig licht zijn de bij doorlating waargenomen lichte kringen juist daar, waar men bij terugkaatsing er zwarte waarneemt.

De oorzaak dezer verschijnselen moet gezocht worden in de interferentien van de stralen, die aan de bovenste en aan de onderste oppervlakte der dunne laag worden teruggekaatst. Zij AB (Fig. 428) een lichtbundel, dan zal die aan de eerste oppervlakte MN van de dunne laag gedeeltelijk worden teruggekaatst volgens BC, gedeeltelijk gebroken volgens BD; bij D aangekomen wordt hij gedeeltelijk teruggekaatst volgens DE, gedeeltelijk gebroken volgens DI. De lichtstraal DE ondergaat bij E eene breking volgens EF, en eene terugkaatsing volgens EG, terwijl deze laatste straal bij G andermaal eene breking ondergaat. Geeft men nu acht op de wegen, door de lichtbundels afgelegd, dan ziet men, dat het verschil wordt uitgedrukt door de som van BD en DE bij terugkaatsing, door de som van DE en EG bij doorlating van het licht. Volgens de leer der interferentien moet er versterking van licht in den uittredenden lichtbundel BCEF of DIGH plaats hebben, als die som gelijk is aan eene of meer geheele golflengten, doch vernietiging van licht, wanneer die som gelijk is aan een oneven getal halve golflengten. Het ontstaan van donkere of lichte kringen is dus een noodzakelijk gevolg van de verschillende dikte der laag. Bij den toestel van Newton zal die dikte voor den eersten kring, die op de zwarte vlek in het midden volgt, $\frac{1}{4}$ van eene golflengte, dus ongeveer 0,00016 streep moeten bedragen; voor de volgende is de afstand der beide platen 3 maal, voor de daaropvolgende 5 maal grooter.

Fig. 428.



Gebruikt men geen enkelvoudig, maar wit licht, dan moet men eigenlijk al de gekleurde kringen zien, die men in elke kleur van het spectrum afzonderlijk waarneemt; door de ongelijke stralen dier kringen in de verschillende kleuren komen zij over elkander te liggen, en vormen daardoor kringen, waarvan de kleuren geene enkelvoudige maar gemengde kleuren zijn. Dat wij bij wit licht

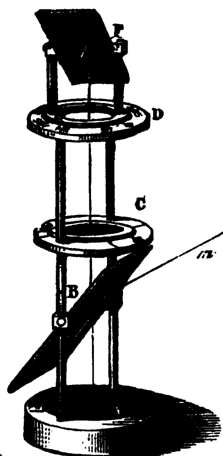
veel minder kringen waarnemen is ook een gevolg van het over elkander liggen der verschillende kringen; hun onderlinge afstand is voor de meer van het midden verwijderde kringen veel geringer en zij komen dus zoo op elkander te liggen, dat zij wit licht vormen.

De kleuren der strepen bij de interferentien en bij de buiging moeten op gelijke wijze verklaard worden.

H. POLARISATIE EN DUBBELE BREKING VAN HET LICHT.

441. **Polarisatie van het licht door terugkaatsing.** — Laat men op een zwart of van achteren zwart gemaakt stuk spiegelglas een lichtstraal vallen onder een hoek van 35° 25′, dan zal de teruggekaatste lichtstraal een even grooten hoek met het vlak van dien spiegel maken. Deze lichtstraal heeft echter door deze terugkaatsing bijzondere eigenschappen verkregen; laat men hem namelijk andermaal onder een even grooten hoek op een tweeden spiegel vallen, dan zal hij in sommige standen wel, in andere niet worden teruggekaatst. Zijn de spiegels evenwijdig, dan wordt hij wel teruggekaatst; laat men den eenen 90° omdraaijen om de teruggekaatste lichtstraal als as, dan heeft er volstrekt geene terugkaatsing plaats; draait hij nog 90° om, zoodat zijn stand juist tegenovergesteld is aan den oorspronkelijken, dan wordt de lichtstraal wel teruggekaatst; is de stand zoodanig, dat de omdraaijing 270° bedraagt, dan wordt er weder geene terugkaatsing waargenomen. De door den eersten spiegel teruggekaatste lichtstraal, die deze bijzondere eigenschappen verkregen heeft, wordt *gepolariseerd* genoemd.

Fig. 429.



Men kan de verschijnselen van de polarisatie door terugkaatsing duidelijk maken door den in fig. 429 afgebeelden toestel van Nörremberg. In den voet bevindt zich een horizontale spiegel A, alsmede twee metalen stijltjes, waartusschen een in een lijstje gezet spiegelglas B geplaatst is, dat om eene horizontale as kan draaijen. In den ring C past een kleinere met een glazen plaatje voorziene ring. In den bovensten verdeelden ring D past een kleinere E, waarop een spiegeltje F bevestigd is, dat even als B om eene

horizontale as kan draaijen; daar de ring E zich vrij in D kan bewegen, kan men aan den bovensten spiegel alle mogelijke standen ten opzigte van den ondersten geven. Plaatst men nu beide zoodanig, dat zij een hoek van 35° 25′ maken met de vertikaal, en laat men op het spiegelglas B een straal *mn* zoodanig vallen, dat hij een hoek van 35° 25′ maakt met het glas, dan zal hij in de rigting *np*, dat is vertikaal naar beneden teruggekaatst, en door die terugkaatsing gepolariseerd worden. Door den spiegel A wordt de gepolariseerde lichtstraal teruggekaatst en door het spiegelglas B grootendeels doorgelaten, zoodat het gepolariseerde licht in de rigting *nq* op den bovensten spiegel valt. Heeft men nu den ring E zoo gedraaid, dat het vlak van den spiegel F evenwijdig is met dat van B, dan zal de gepolariseerde lichtstraal door F teruggekaatst worden; de vlakken van terugkaatsing op beide spiegels vallen in dit geval zamen. Draait men echter den bovensten spiegel 90° om, zoodat de vlakken van terugkaatsing een regten hoek met elkander maken en dus den in de figuur aangewezen stand hebben, dan heeft er op dien spiegel geene terugkaatsing plaats; in de tusschen liggende standen wordt er slechts gedeeltelijke terugkaatsing waargenomen, en wel des te geringer, naarmate de stand van den spiegel meer van den oorspronkelijken verschilt. Laat men den spiegel F nogmaals 90° omdraaijen, dan vallen de vlakken van terugkaatsing op B en F weder zamen, en het licht wordt teruggekaatst; bedraagt de omdraaijing 270°, zoodat de vlakken van terugkaatsing weder loodregt op elkander slaan, dan neemt men weder geene terugkaatsing waar.

Geeft men aan de spiegels eenen anderen hoek dan 35° 25′, dan neemt men deze verschijnselen wel eenigzins, maar slechts in zeer geringe mate waar, en wel des te minder, naarmate de hoek meer van de opgegevene waarde verschilt; alleen onder dien hoek invallende wordt het licht volkomen gepolariseerd; men geeft daarom aan dien hoek den naam van *polarisatiehoek*. Deze is niet voor alle stoffen dezelfde; voor glas bedraagt hij, zoo als gezegd is, 35° 25′, voor kwarts 32° 28′, voor water 37° 25′, voor diamant 22°. Volgens de onderzoekingen van Brewster (1814) is de polarisatie-hoek die, voor welke de teruggekaatste en de gebrokene lichtstraal loodregt op elkander staan. Kent men dus den brekings-exponent, dan kan men daaruit den polarisatie-hoek afleiden; men zal gemakkelijk vinden, dat de cotangens van den polarisatie-hoek derhalve gelijk moet zijn aan den brekings-exponent. Bij metalen spiegels wordt geene polarisatie waargenomen.

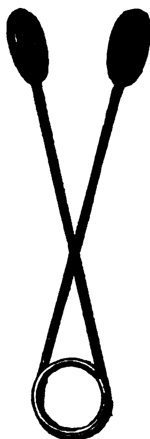
Het vlak, waarin de teruggekaatste lichtstraal wordt gepolariseerd, noemt men het *polarisatie-vlak*.

442. **Polarisatie van het licht door straalbreking.** — Laat men een lichtstraal onder den polarisatie-hoek invallen op een aan den achterkant niet zwart gemaakt spiegelglas, dan wordt hij gedeeltelijk gebroken, eerst bij de invalling op, daarna bij de uittreding uit het glas. De uittredende lichtstraal is alsdan ook gepolariseerd, doch slechts weinig, daar het gepolariseerde licht vermengd is met eene aanzienlijke hoeveelheid niet gepolariseerde lichtstralen. Plaatst men echter verscheidene glazen platen, bijv. een tiental, onmiddellijk achter elkander, dan wordt het licht nagenoeg geheel gepolariseerd; men neemt dan bij den uittredenden lichtbundel dergelijke verschijnselen waar, als wij zoo even vermeld hebben voor het door terugkaatsing gepolariseerde licht. Stelt men den bundel glazen platen in de plaats van den ondersten spiegel van fig. 429, en zoodanig dat die platen evenwijdig zijn met den bovensten spiegel, dan wordt het gepolariseerde licht door dien spiegel niet teruggekaatst; draait men den spiegel 90° om, dan heeft er daarentegen wel terugkaatsing plaats.

443. **Polarisatie van het licht door tourmalijn.** — Tourmalijn-kristallen hebben onder zekere omstandigheden ook de eigenschap van het licht te polariseren. Het tourmalijn komt in de natuur voor als een zesvlakkig prisma en heeft dus slechts ééne as. Slijpt men een tourmalijnplaatje, waarvan de evenwijdige oppervlakken evenwijdig zijn aan de as, dan zal een lichtstraal, die daardoor gegaan is, evenzoo gepolariseerd zijn, als wanneer hij onder een hoek van 35° 25′ door een glazen spiegel was teruggekaatst; heeft het plaatje zoodanigen stand, dat de as van het kristal loodregt staat op het polarisatie-vlak van de invallende lichtstralen, dan wordt het licht volledig doorgelaten; maakt echter de as van het plaatje eenen anderen hoek met dat polarisatievlak, dan is het doorgelaten licht des te zwakker, naarmate die hoek kleiner is; valt de as geheel in het polarisatie-vlak, dan wordt er geen licht doorgelaten, zoo ten minste het plaatje niet al te dun is.

Uit deze eigenschappen volgt, dat men met twee zoodanige plaatjes een polarisatietoestel kan zamenstellen. Plaatst men die twee plaatjes zoo boven elkander, dat de beide assen evenwijdig loopen, dan zullen zij het licht doorlaten; maken daarentegen die assen een regten hoek met elkander, dan wordt het licht teruggehouden. Men kan zich daarvan gemakkelijk overtuigen, door de plaatjes achter elkander in die twee verschillende standen tegen het licht te houden, en er dan doorheen te zien. Het meest is daartoe geschikt een toestel, zooals in fig. 430 is afgebeeld, die bestaat uit een omgebogen koperdraad, aan wiens uiteinden zich ringen bevinden, waarin schijfjes van kurk

Fig. 430.



bevestigd zijn, welke in hun midden van een klein tourmalijn-plaatje voorzien zijn. De schijfjes behooren in de koperen ringen rondgedraaid te kunnen worden.

444. Verklaring van de polarisatie van het licht door de trillings-theorie. — De verschijnselen van de polarisatie van het licht, die in 1811 door Malus ontdekt zijn, kunnen door de emanatie-theorie niet behoorlijk verklaard worden; daarentegen is hare verklaring door de undulatie-theorie zeer eenvoudig.

De trillingen der etherdeeltjes hebben, zooals reeds is opgemerkt, bij eenen gewonen lichtstraal plaats in alle mogelijke op de rigting van den straal loodregt staande rigtingen; valt echter deze straal op eenen spiegel, dan worden alleen die trillingen teruggekaatst, die plaats hebben in een vlak, dat een bepaalden stand ten opzigte van het vlak van terugkaatsing heeft; op dergelijke wijze worden bij de breking stralen doorgelaten, wier trillingen niet meer in alle rigtingen, maar slechts in ééne bepaalde rigting plaats hebben; eveneens laat een tourmalijn-plaatje slechts stralen door, wier trillingen ten opzigte van de kristal-as een bepaalden stand hebben.

Welke de stand in die verschillende gevallen is, laat zich door een tourmalijn-plaatje gemakkelijk bepalen. Houdt men namelijk dit zoo voor het oog, dat de kristal-as een horizontalen stand heeft en draait men het meer of min om die as, dan bemerkt men geene vermindering van licht; laat men het daarentegen draaijen om eene lijn, die loodregt staat op die as, dan heeft er eene zeer merkbare vermindering van licht plaats. Dit kan alleen daaraan worden toegeschreven, dat de rigting der trillingen, welke door het tourmalijn-plaatje kunnen worden doorgelaten, bij draaijing om de as niet ten opzigte van die as verandert, hetgeen bij de draaijing om eene lijn, die loodregt op die as staat, wel het geval moet zijn. Men mag dus daaruit afleiden, dat alleen die trillingen door een tourmalijn-plaatje worden doorgelaten, die plaats hebben in eene rigting, evenwijdig met de as van het kristal.

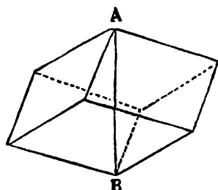
Door middel van zoodanig plaatje kan men nu ook nagaan, welken stand de trillingen van een teruggekaatsten lichtstraal ten opzigte van het vlak van terugkaatsing moeten hebben. Vervangt men namelijk bij den in fig. 429 afgebeelden toestel den bovensten spiegel door een tourmalijn-plaatje, dan bemerkt men, dat de door den ondersten spiegel teruggekaatste straal niet wordt door-

gelaten, wanneer de kristal-as van het plaatje evenwijdig loopt met het vlak van terugkaatsing op den spiegel B. Daaruit volgt, dat de trillingen in dien straal niet evenwijdig kunnen zijn met die as, en dat zij dus loodregt daarop moeten staan en derhalve ook op het vlak van terugkaatsing of op het polarisatievlak van dien spiegel; draait men het plaatje zoodanig om, dat de as evenwijdig is met die rigting, dan zal de gepolariseerde lichtstraal worden doorgelaten. In de door den polarisatie-spiegel teruggekaatste stralen trillen de etherdeeltjes dus alleen in eene rigting, loodregt op het vlak van terugkaatsing. Brengt men dit in verband met hetgeen hiervóór gezegd is over de polarisatie door straalbreking, dan volgt daaruit terstond, dat het vlak, waarin bij de in dat geval gepolariseerde stralen de trillingen plaats hebben, evenwijdig moet zijn met het vlak, waarin de straalbreking en dus ook de polarisatie plaats heeft

Men zal ligt inzien, zonder dat wij dit in alle bijzonderheden nader aantoonen, dat door deze theorie de hiervóór vermelde verschijnselen der polarisatie volledig verklaard worden.

445. **Dubbele straalbreking.** — Wij hebben bij de beschrijving der verschijnselen, die op de breking van het licht betrekking hebben, steeds aangenomen, dat de invallende straal altijd volgens ééne bepaalde rigting gebroken wordt. In enkele gevallen is dit echter niet het geval, en splitst zich de invallende straal bij den overgang in sommige middenstoffen in twee stralen, die elk zijn eigen weg volgen. Neemt men bijv. een kalkspath-kristal, zoo als er een is afgebeeld in fig. 431, en legt men dit op een papier, waarop men eene stip heeft gemaakt, dan ziet men door dit kristal die stip dubbel. Laat men een lichtstraal op zoodanig kristal vallen, dan ziet men twee stralen daaruit te voorschijn treden; daar de hoek van invalling op het kristal voor beiden dezelfde was, moet de hoek van refractie en dus ook de brekingsexponent verschillend zijn.

Fig. 431.



Dit verschijnsel wordt waargenomen op welken kant van het kristal men ook den lichtstraal laat invallen. Heeft men dit echter vooraf geslepen, zoodat het begrensd is door vlakken, welke loodregt staan op de diagonaal AB, die de *hoofd-as* van het kristal genoemd wordt, en laat men een lichtstraal loodregt op een dezer vlakken invallen, dan wordt hij niet dubbel gebroken, zoodat men slechts een enkelen straal waarneemt. De rigting, volgens welke een invallende lichtstraal niet dubbel gebroken wordt, noemt men de

optische as van het kristal; deze valt dus bij een kalkspath-kristal met de kristal-as zamen.

Kalkspath, ook wel IJslandsch kristal genaamd, is niet het eenige, waarin dubbele straalbreking plaats heeft; ook in kwarts of bergkristal, tourmalijn, mica, gips en vele andere wordt hetzelfde verschijnsel waargenomen. Heeft in deze kristallen slechts in ééne rigting enkele breking plaats, doch in alle andere dubbele breking, zooals in kalkspath, dan noemt men ze *één-assige* kristallen; wordt in twee verschillende rigtingen enkele breking waargenomen, dan heeten zij *twee-assige.*

446. **Gewone en buitengewone straal.** — Zij ABCD (Fig. 432) eene *hoofddoorsnede* van een kalkspath-kristal, dat is eene doorsnede die door de optische as gaat en loodregt staat op een der zijvlakken van het kristal.

Fig. 432.



Een in O geplaatst oog ziet eene stip P onder het kristal dubbel in P′ en P″; de van P in de rigtingen PM en PN uitgaande lichtstralen komen beide in het oog. Draait men nu het kristal, doch zoodanig, dat het steeds op het vlak AB, waarop het rust, blijft staan, dan ziet men de eene stip P′ steeds op dezelfde plaats blijven, terwijl de andere P″ zich bij het ronddraaijen om P′ beweegt. Het eerste noemt men het *gewone*, het andere het *buitengewone* beeld; evenzoo heet ONP de gewone en OMP de buitengewone straal. De onderzoekingen hebben geleerd, dat de gewone straal altijd de wetten der enkele straalbreking volgt, en dat dit ook met den buitengewonen het geval is, wanneer de breking plaats heeft in eene doorsnede, die loodregt op de as gerigt is, alleen met dat onderscheid, dat de brekings-exponent eene andere waarde heeft dan voor den gewonen straal. Bij kalkspath en bij verscheidene andere kristallen is de brekings-exponent van den buitengewonen straal kleiner dan die van den gewonen; bij kwarts is het omgekeerde het geval. Heeft daarentegen de breking plaats in eene hoofddoorsnede, dan vallen wel de vlakken van invalling en breking zamen, maar de verhouding tusschen de sinussen der hoeken van invalling en breking is niet altijd dezelfde. Bovendien is de snelheid van het licht voor beide stralen ongelijk. Terwijl de gewone straal in alle rigtingen dezelfde snelheid heeft, is zulks bij den buitengewonen niet het geval. Alleen in de rigting van de as bezitten zij gelijke snelheid.

Bij de twee-assige kristallen volgt geen der gebrokene stralen de wetten

der gewone straalbreking, behalve in eene bepaalde doorsnede, waarin de gewone, en in eene andere, waarin de buitengewone straal volgens de wetten der enkele straalbreking gebroken wordt; wij kunnen hier echter in geene bijzonderheden dienaangaande treden.

De oorzaak van de dubbele breking moet volgens Fresnel gezocht worden in de ongelijke digtheid van den lichtether in de kristallen, welke de eigenschap hebben van een invallenden lichtstraal in twee stralen te splitsen; van daar dat de snelheid der trillingen, zooals zooeven is opgemerkt, in de eene rigting aanzienlijker is dan in de andere.

447. **Polarisatie door dubbele straalbreking.** — Onderzoekt men de beide beelden, die men door een dubbel straalbrekend kristal, bijv. door een kalkspath-rhomboëder waarneemt, door middel van een tourmalijnplaatje, dan bevindt men, dat beide stralen gepolariseerd zijn; wanneer men de tourmalijn draait, verdwijnen beurtelings de beide beelden, en wel elk tweemaal gedurende eene geheele omdraaijing. Is de as van het tourmalijnplaatje evenwijdig met de as van het kalkspath-kristal, dan verdwijnt het gewone beeld; draait men dan het plaatje om, dan verschijnt het gewone beeld langzamerhand weder, terwijl het buitengewone evenzoo in sterkte afneemt; staan de assen van de tourmalijn en het kalkspath-kristal loodregt op elkander, dan bereikt het gewone beeld den grootsten glans, terwijl het buitengewone geheel verdwenen is. Daaruit blijkt dus, dat de beide stralen gepolariseerd zijn in vlakken, die loodregt op elkander staan; dat de trillingen in den gewonen straal plaats hebben in eene rigting loodregt op de as, en dat de trillingen van den buitengewonen straal geschieden in een vlak, dat door de rigting van den straal en van de as gaat, of wat hetzelfde is, in eene hoofddoorsnede van het kristal.

448. **Polariskopen of analyseurs.** — Wij hebben hiervóór reeds in het zwarte of zwart gemaakte glas, alsook in den tourmalijn, een middel leeren kennen om te onderzoeken, of het licht al of niet gepolariseerd is; zoodanige toestellen, als de in fig. 429 afgebeelde of een gewoon tourmalijnplaatje, noemt men daarom een *polariskoop* of *analyseur.* Beide zijn echter in het gebruik lastig; de eerste omdat hij vrij omslagtig is, de andere omdat de tourmalijn-kristallen altijd meer of min gekleurd zijn en dus slechts gekleurd licht doorlaten. De eigenschap, dat ook door dubbele straalbreking het licht gepolariseerd wordt, stelt ons echter in staat polariskopen zamen te stellen, waaraan die bezwaren niet verbonden zijn. Een kalkspath-kristal zoude op

zich zelf reeds voldoende zijn, zoo niet door de breking het licht tevens werd ontleed. Om hierin te voorzien verbindt men een kalkspath-prisma met een prisma van gewoon glas in dier voege, dat de door het eene veroorzaakte dispersie door het andere wordt weggenomen. Op die wijze verkrijgt men dan een achromatisch kalkspath-prisma. Valt een gepolariseerde lichtbundel op zoodanig prisma, dan bemerkt men, wanneer men het ronddraait, vier verschillende standen, waarin slechts één straal wordt doorgelaten, en waarin men dus slechts één beeld waarneemt. Die vier standen maken regte hoeken met elkander; in de tusschenliggende neemt men twee beelden waar, doch waarvan de lichtsterkte bij de minste omdraaijing verandert. Het gemakkelijkst kan men deze proef nemen, wanneer men in den in fig. 429 afgebeelden polarisatie-toestel den bovensten spiegel vervangt door een koperen kokertje, waarin men zoodanig achromatisch kalkspath-prisma geplaatst heeft. Men behoeft dan slechts daardoor naar den ondersten spiegel te zien, om de hier vermelde verschijnselen waar te nemen.

De meest gebruikte polariskoop is de door Nicol uitgedachte, welke naar hem doorgaans het Nicol'sche prisma genoemd wordt. Om het te vervaardigen neemt men een langwerpig natuurlijk kalkspath-prisma, zooals in fig. 433 is afgebeeld. Het bovenste vlak P wordt zoodanig afgeslepen, dat het met het zijvlak K een hoek van 68° maakt; vervolgens slijpt men van het hoekpunt E weg, zoodat daar een nieuw vlak ontstaat, en wel loodregt op het vlak, dat bovenaan nieuw is aangeslepen. Twee aldus geslepene prisma's worden door middel van canada-balsem tegen elkander gelegd, op de wijze als in doorsnede in fig. 434 is voorgesteld, waar NP de lijn is, volgens welke zij tegen elkander liggen. Een invallende lichtstraal AB splitst zich bij MN in twee stralen BC en BD; de gewone BC wordt door de laag canada-balsem, waarvan de brekings-exponent kleiner is dan de gewone van kalkspath, totaal teruggekaatst, en verlaat dus het kristal volgens CE. De buitengewone BD wordt door de laag balsem doorgelaten, daar de brekings-exponent dier stof grooter is dan de buitengewone van kalkspath, en verlaat het prisma volgens FG,

Fig. 433.

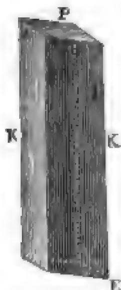


Fig. 434.



die evenwijdig loopt met AB. Men verkrijgt dus met een Nicol'sch prisma slechts één gepolariseerd beeld, en het kan dus, even als het tourmalijnplaatje, als polariskoop dienen. Het heeft bovendien het voordeel van geen dubbele beelden te geven.

Het Nicol'sche prisma wordt doorgaans, even als het achromatisch kalkspathprisma, in een koperen kokertje bevestigd, en tot waarneming der polarisatieverschijnselen op den toestel van Nörremberg, waarvan men den bovensten spiegel heeft weggenomen, geplaatst.

449. **Kleuren, veroorzaakt door gepolariseerd licht in dubbel straalbrekende plaatjes.** — Plaatst men een zeer dun door klieving verkregen gips-plaatje tusschen de beide spiegels van een polarisatie-toestel, dan schijnt het meer of min helder gekleurd. Legt men een zoodanig plaatje, dat niet dikker mag zijn dan 0,3 streep, op het tafeltje D van den in fig. 429 afgebeelden polarisatie-toestel van Nörremberg, en ziet men dan in den bovensten spiegel, dan kan men daarin de kleur waarnemen. Zijn de beide spiegels zoodanig geplaatst, dat de vlakken van terugkaatsing loodregt op elkander staan, dan wordt het licht door den bovensten spiegel niet teruggekaatst, wanneer het gips-plaatje zich niet tusschen de beide spiegels bevindt; plaatst men dit er tusschen, dan bemerkt men, dat het beeld gekleurd is, maar tevens dat de helderheid der kleur niet voor alle standen van dat plaatje dezelfde is; draait men het namelijk in zijn eigen vlak om, dan ziet men het beurtelings duidelijker en minder duidelijk, ja zelfs in sommigen standen geheel onzigtbaar worden.

Zijn de oppervlakken van het plaatje volkomen vlak en is het overal even dik, dan is de kleur overal dezelfde; is het op verschillende plaatsen ongelijk in dikte, dan is ook de kleur op die plaatsen eene verschillende.

De oorzaak dezer verschijnselen moet alleen gezocht worden in interferentie van het licht. Het gips is een twee-assig dubbel-straalbrekend kristal, welks optische assen in het vlak van het plaatje liggen. Een daarop invallende lichtstraal wordt dus in twee stralen geplitst, die regthoekig ten opzigte van elkander gepolariseerd zijn, doch zoo de lichtstraal loodregt daarop invalt, gezamenlijk voortgaan; de trillingen der beide stralen zijn echter loodregt ten opzigte van elkander gerigt. Den stand, waarin het gips-plaatje geene werking op de doorgelatene stralen uitoefent, en waarin dus geene kleuring wordt waargenomen, kan men gemakkelijk bepalen. Men behoeft het slechts zoo lang te draaijen, tot het in dien stand is; alsdan maakt men er eene streep op, welke de doorsnede van het plaatje met het polarisatie-vlak van den ondersten spiegel aanduidt. In

dezen stand kan de invallende straal slechts trillingen in de rigting van die streep in het plaatje doen ontstaan, doch niet in eene rigting loodregt daarop; in dit geval wordt dus slechts de eerstvermelde straal doorgelaten; daar deze door den bovensten spiegel niet wordt teruggekaatst, schijnt het gips-plaatje in dezen stand donker. Hetzelfde zal het geval zijn, wanneer het polarisatie-vlak van het ondersten spiegel zamenvalt met eene streep, welke men loodregt op de eerste op het plaatje getrokken heeft. In den tusschenliggenden stand, wanneer het polarisatie-vlak met die beide lijnen hoeken van 45° maakt, zal, wanneer men in rood licht of door een rood gekleurd glas waarneemt, het plaatje zich helder of donker vertoonen, naar gelang van zijne dikte. Het is helder, wanneer de eene straal den anderen een oneven aantal halve golflengten vooruit is, doch duister wanneer het verschil een even getal halve golflengten bedraagt. Gebruikt men geen enkelvoudig maar wit licht, dan bemerkt men eene kleur, die, even als bij de kleuren van dunne plaatjes en de kringen van Newton (440), afhankelijk is van de dikte van het plaatje, zoodat men zelfs, de dikte van het plaatje kennende, de kleur vooraf bepalen kan. Verandert de hoek, zoodat hij meer of minder dan 45° bedraagt, dan vermindert de helderheid der kleur, omdat het trillingsvlak in het gips-plaatje dan meer tot het polarisatie-vlak nadert.

Heeft men aan het gips-plaatje zoodanigen stand gegeven, dat de kleur zoo helder mogelijk is, en draait men dan den bovensten spiegel om de vertikale as van den geheelen toestel om, dan verliest de kleur meer en meer van hare sterkte; heeft men dien 45° omgedraaid, dan schijnt het plaatje geheel kleurloos; draait men nog verder, dan vertoont zich de complementaire kleur van de eerste; zij wordt het levendigst, wanneer de omdraaijing 90° bedraagt, dat is, wanneer de beide spiegels evenwijdig met elkander zijn, of in zoodanigen stand, dat de trillingsvlakken van beide zamenvallen. De oorzaak van dit verschijnsel is daarin te zoeken, dat na eene omdraaijing van 45° het trillingsvlak van den bovensten spiegel zamenvalt met het trillingsvlak van den eenen straal in het plaatje, in welk geval de trillingen door den spiegel worden teruggekaatst; de trillingen van den anderen straal worden op dat oogenblik niet teruggekaatst, en er kan dus geene interferentie en dus ook geene kleuring plaats hebben.

Wij kunnen hier omtrent de nadere oorzaken der kleuren niet in meer bijzonderheden treden; wij bepalen ons daarom tot de mededeeling van de volgende proef. Vervangt men den bovensten spiegel door een dubbel-straalbrekend prisma, dan ziet men daardoor twee beelden van het gips-plaatje, die complementaire kleuren hebben; deze zijn het sterkst gekleurd, wanneer het trillingsvlak van den eenen straal in het dubbel-straalbrekend prisma zamenvalt met het trillings-

vlak van den ondersten spiegel. Daar, waar de beide beelden elkander bedekken, neemt men wit licht waar. Het duidelijkst bemerkt men dit, wanneer men boven het gips-plaatje een zwart scherm of diaphragma geplaatst heeft, waarin eene ronde opening is.

Zeer opmerkenswaardig zijn nog de volgende kleurverschijnselen, die men bij de polarisatie in sommige kristallen waarneemt. Neemt men den in fig. 430 afgebeelden tang met twee tourmalijn-plaatjes, en plaatst men tusschen die beide plaatjes een kalkspath-kristal, dat regthoekig op de as geslepen is, dan bemerkt men, als men door dien toestel naar het licht ziet, fraai gekleurde kringen. Zijn de tourmalijn-plaatjes zoodanig geplaatst, dat de polarisatie-vlakken loodregt op elkander staan, dan bemerkt men een stelsel gekleurde kringen met een zwart kruis, zooals in fig. 435 is afgebeeld; zijn de polarisatie-vlakken onderling evenwijdig, dan neemt men de in fig. 436 afgebeelde kringen met een wit kruis waar; men zal terstond bemerken, dat de kleuren in het eene geval de complementaire zijn van die in het andere. De oorzaak van deze gekleurde kringen is daarin te zoeken, dat, aangezien in het midden van het

Fig. 435.



Fig. 436.



gezigtsveld de beide stralen in de rigting van de optische as door het kalkspath-kristal gaan, aldaar geene splitsing dier stralen en dus ook geene kleuring plaats heeft; de op andere plaatsen doorgelatene en tot het oog komende stralen loopen niet juist in de rigting der as en worden dus gesplitst; de eene straal is bij den anderen meer of min vooruit, en er heeft dus interferentie en kleuring plaats. Het zwarte kruis in het eerste geval ontstaat daardoor, dat het gepolariseerde licht niet wordt doorgelaten in het vlak van de hoofddoorsnede van den tourmalijn en in eene daarop loodregt staande rigting.

Bij de twee-assige kristallen worden dergelijke kringen waargenomen, doch

deze zijn, in plaats van concentrisch, meer zamengesteld; zij vormen meestal kromme lijnen met twee middenpunten, die even als het zwarte of witte kruis van gedaante veranderen, wanneer het kristal zelf wordt omgedraaid.

Dergelijke kleurverschijnselen kan men ook waarnemen in gewoon glas, wanneer het in eene of meer rigtingen wordt geperst of gebogen, of ook wanneer het na verwarming snel wordt afgekoeld. Door zoodanige bewerking verandert de moleculaire toestand van het glas, dat daardoor dezelfde eigenschappen als de dubbel-straalbrekende kristallen verkrijgt.

450. **Circulaire polarisatie.** — Plaatst men op het tafeltje van den polarisatie-toestel van Nörremberg een plaatje van kwarts, dat loodregt op de as geslepen is, dan vertoont zich het beeld daarvan in den bovensten spiegel gekleurd; het verandert van kleur, wanneer die spiegel omgedraaid wordt, doch vertoont zich bij geenen stand van dien spiegel kleurloos. De kleuren volgen elkander in dezelfde volgorde op als bij het spectrum, namelijk: rood, oranje, geel, enz. Bij sommige kwartskristallen is de volgorde echter juist de tegenovergestelde, zoodat men om de kleuren elkander op gelijke wijze te doen opvolgen, den spiegel in tegenovergestelde rigting moet omdraaijen. Vervangt men den bovensten spiegel door een dubbel-straalbrekend prisma, dan ziet men daarin, wanneer men een diaphragma met ronde opening gebruikt, twee beelden naast elkander, waarvan het eene de complementaire kleur van het andere heeft. Draait men het prisma, dan veranderen de kleuren, maar zij blijven steeds complementair ten opzigte van elkander. De oorzaak van dit verschijnsel, waaraan men den naam van *circulaire polarisatie* gegeven heeft, is daarin te zoeken, dat de gepolariseerde straal, na door het kwartskristal gegaan te zijn, niet meer in hetzelfde vlak gepolariseerd is, als voor dat hij daardoor ging. Blijkens het zooeven vermelde moet bij sommige kwartskristallen de afwijking van het polarisatievlak ter regter zijde, bij andere ter linker zijde van het oorspronkelijke plaats hebben.

Kwartskristallen zijn niet de eenige, waarbij men de circulaire polarisatie waarneemt; ook andere stoffen hebben in meerdere of mindere mate dezelfde eigenschap. Tot die, welke het polarisatie-vlak regts doen draaijen, behooren eene oplossing van rietsuiker in water, eene oplossing van kamfer in alcohol, van dextrine, wijnsteenzuur; onder de links draaijende terpentijnolie, eene oplossing van druivensuiker, van arabische gom en andere.

Gebruikt men gekleurd licht, of ziet men door het dubbel-straalbrekend prisma, na er een gekleurd glaasje voor geplaatst te hebben, dan bemerkt men, dat de omdraaijing of afwijking van het polarisatie-vlak niet dezelfde is

voor de verschillende kleuren, maar toeneemt met de breekbaarheid der kleuren. Blijft de kleur dezelfde, en neemt men verschillende plaatjes uit een zelfde kwartskristal, dan is de omdraaijing evenredig aan de dikte der plaatjes.

Op grond van deze eigenschap van de zooeven vermelde vochten en wel bepaaldelijk van eene suikeroplossing, heeft Biot een toestel zamengesteld, waarmede men het suikergehalte van eene oplossing kan bepalen; die toestel, later door Soleil gewijzigd en verbeterd, wordt *saccharimeter* genaamd; hij bewijst groote diensten bij het onderzoek van de verschillende soorten van rietsuiker, voornamelijk om na te gaan hoeveel ten honderd kristalliseerbare suiker zij bevatten. Eene beschrijving van dien toestel zoude ons hier echter te ver voeren.

451. **Omdraaijing van het polarisatie-vlak door den electrischen stroom.** — Wij moeten ten slotte nog gewag maken van eene eigenschap, welke in 1846 door Faraday is ontdekt, en daarin bestaat, dat die bijzondere moleculaire toestand van doorschijnende ligchamen, welke oorzaak is, dat voor een doorgelaten gepolariseerden lichtstraal het polarisatie-vlak eene zekere omdraaijing ondergaat, ook door den invloed van den electrischen stroom kan worden te weeg gebragt.

Men kan zich hiervan overtuigen door middel van den in fig. 332 afgebeelden toestel. De cilinders A en A′ zijn, zooals vroeger vermeld is, doorboord, zoodat een aan den eenen kant bij A intredende lichtstraal bij A′ er uitkomt. Plaatst men nu in die openingen twee Nicol'sche prisma's in dier voege, dat de beide hoofddoorsneden loodregt op elkander staan, dan zal een invallende lichtstraal door het eerste gepolariseerd, en dientengevolge door het tweede niet doorgelaten worden; ziet men dan door het laatstgemelde, dan schijnt het gezigtsveld geheel duister. Plaatst men nu tusschen de polen van A en A′ een stuk zwaar loodglas (kiezelboriumzuur loodoxyd), ter lengte van ongeveer 6 of 7 duim, en brengt men daarna de polen zoo digt bij elkander, als dit stuk glas het toelaat, dan zal, zoolang de electrische stroom niet om de beide zich in A en A′ bevindende week ijzeren cilinders gaat, het gezigtsveld duister blijven. Zoodra echter de stroom wordt gesloten, wordt het gezigtsveld helder; draait men dan het prisma, waardoor men ziet, een weinig om, dan wordt het weder duister. Het polarisatie-vlak heeft dus eene zekere omdraaijing of afwijking ondergaan, even als het geval zoude geweest zijn, wanneer in plaats van het onder den invloed van den stroom verkeerend stuk glas een dergelijk ligchaam als kwarts, waarbij men altijd circulaire polarisatie waarneemt, tusschen de beide prisma's was geplaatst.

De grootte der afwijking wordt aangeduid door het getal graden, welke men het prisma heeft moeten omdraaijen; ten einde deze te kunnen waarnemen bevindt zich doorgaans aan het uiteinde van A′ een verdeelde cirkel. Geeft men bij deze proef acht op de rigting van den electrischen stroom, dan vindt men, dat de rigting, volgens welke het polarisatie-vlak omgedraaid wordt, dezelfde is als die van den positieven stroom in de omwindingen van de electromagneten A en A′.

Uit onderzoekingen van Faraday en Becquerel is gebleken, dat alle doorzigtige ligchamen in meerdere of mindere mate deze eigenschap hebben; het sterkst echter wordt zij waargenomen bij het bovengemelde soort van glas. Plaatst men een kristal, waarbij ook in den gewonen toestand circulaire polarisatie wordt waargenomen, tusschen de polen der electromagneten, dan verandert de waarde van de omdraaijing, welke buiten de werking van den electrischen stroom in dat kristal wordt waargenomen.

Het is voorts gebleken, dat deze verschijnselen eveneens worden waargenomen, wanneer men den stroom eenvoudig door een spiraaldraad om het doorzigtig ligchaam laat gaan, zonder dat er week ijzeren cilinders of electromagneten bij gebruikt worden. De afwijking heeft ook dan plaats in dezelfde rigting, volgens welke de positieve stroom om het ligchaam loopt.

Faraday meende in het begin, dat deze verschijnselen moesten worden toegeschreven aan eene onmiddellijke werking der magnetische of electrische krachten op het licht. Algemeen echter houdt men het thans er voor, dat door den invloed van den electrischen stroom het glas of het kristal zekere moleculaire veranderingen ondergaat, welke eene afwijking van het polarisatie-vlak van den doorgelaten lichtstraal ten gevolge hebben.

I. OVEREENKOMST TUSSCHEN LICHT EN WARMTE.

452. **Breking en dispersie van warmtestralen.** — Wij moeten thans, na de verschijnselen van het licht afgehandeld te hebben, nogmaals terugkeeren tot sommige eigenschappen der stralende warmte, waarvan wij in het VIIde hoofdstuk reeds melding hebben gemaakt, doch die wij toen niet volledig konden behandelen, dewijl wij de eigenschappen van het licht nog niet hadden verklaard. Dat warmstestralen even als lichtstralen gebroken worden, is vroeger (170) reeds bewezen, doch niet dat breking met dispersie gepaard gaat. Dit kan nogtans gemakkelijk aangetoond worden.

Laat men in een donker vertrek door eene kleine opening een bundel zonnestralen vallen op eene lens van steenzout en daarna op een prisma van dezelfde stof, dan zal men een zeer duidelijk spectrum verkrijgen op een scherm, dat men geplaatst heeft op eenen afstand van de lens, ongeveer twéemaal grooter dan haar brandpunts-afstand. Plaatst men nu voor het scherm eene thermo-electrische kolom, zoodat men daarmede verschillende gebrokene lichtstralen kan opvangen, dan zal men aan den multiplicateur aanstonds bemerken, dat ook de warmtestralen in dezelfde rigting gebroken zijn. De wijze echter, waarop de warmte over de verschillende deelen van het spectrum verdeeld is, verschilt aanmerkelijk van die, waarop het licht verspreid is. In de violette stralen bemerkt men slechts eene geringe afwijking van de naald van den multiplicateur; naarmate men meer tot de roode stralen nadert, neemt de werking toe; zet men het onderzoek nog verder voort, dan bemerkt men, dat er behalve de lichtgevende stralen nog andere zijn, die minder breekbaar zijn dan deze, en waarvan de warmte nog aanzienlijker is dan die van het uiterste rood; de warmte neemt toe over eene uitgestrektheid, die ongeveer gelijk is aan de helft van het lichtspectrum daarna neemt zij echter schielijk af; op eenen afstand van het uiterste rood, gelijk aan de geheele breedte van het lichtspectrum, neemt men geene warmte meer waar. In de ultra-violette stralen, die, zooals wij gezien hebben, zich door hunne scheikundige werking onderscheiden, neemt men ook warmte waar, doch nog minder dan in het uiterste violet.

Uit deze proef, die het eerst door W. Herschell (1803) met een glazen prima is gedaan, doch later door Melloni met prisma's van meer diathermane stoffen is herhaald, blijkt dus, dat het warmte-spectrum veel uitgebreider is dan het lichtspectrum. Zij geeft tevens eene bevestiging van hetgeen wij hiervóór (169) op andere gronden hebben aangetoond, dat er namelijk verschillende soorten van warmtestralen of stralen van verschillende thermochrose zijn, even als er lichtstralen zijn van verschillende kleur.

Masson en Jamin hebben zich onlangs (1859) bezig gehouden met een naauwkeurig onderzoek van de eigenschappen der verschillende stralen van het warmte-spectrum. Daaruit is gebleken, dat bij die stralen, welke tegelijk lichtgevend en warmtegevend zijn, het vermogen om warmte en licht te geven in gelijke verhouding wordt doorgelaten. Een rood glas bijv. dat alleen rood licht doorlaat, laat ook alleen de bij die kleur behoorende warmtestralen door; plaatjes van steenzout, die met rookzwart bedekt zijn, en dus geen licht doorlaten, houden eveneens alle warmtestralen tegen, die bij het lichtspectrum behooren. Wanneer men de stralen op niet-enkelvoudig gekleurde

glazen vallen laat, die dus slechts een gedeelte van het licht doorlaten, blijkt de verhouding tusschen de invallende en doorgelatene stralen voor het licht en voor de warmte dezelfde te zijn.

Bij de duistere warmtestralen, die aan gene zijde van het rood in het warmte-spectrum gelegen zijn, kan geene vergelijking met het licht plaats hebben; laat men ze gaan door verschillende kleurlooze en volkomen doorschijnende ligchamen, dan blijkt het, dat zij in zeer ongelijke hoeveelheid worden doorgelaten. Men verkrijgt daardoor de bevestiging van het reeds hiervóór (169) medegedeelde, dat steenzout de eenige stof is, welke de duistere warmtestralen geheel doorlaat, en dus ook voor deze volkomen diathermaan en athermochroisch is.

Volgens onderzoekingen van Seebeck is de dispersie der warmtestralen niet voor alle stoffen dezelfde. Bij een prisma van flintglas zijn de sterkste warmtestralen, even als bij het steenzout, buiten het rood gelegen; bij crownglas vallen zij in het rood, bij een met water gevuld prisma in het geel.

453. **Polarisatie en dubbele breking der warmtestralen.** — Uit de onderzoekingen van Melloni en anderen is gebleken, dat warmtestralen, even als lichtstralen en wel onder dezelfde omstandigheden, kunnen gepolariseerd worden. Melloni plaatste eene warmtebron in het brandpunt van een hollen spiegel, en liet de teruggekaatste evenwijdige stralen vallen op eene lens van steenzout; bij het brandpunt van de door deze lens gebrokene stralen plaatste hij twee tourmalijn-plaatjes. De door dezen polarisatie-toestel doorgelatene warmtestralen werden door eene tweede lens van steenzout vereenigd en naar de thermo-electrische kolom gerigt. Waren de tourmalijn-plaatjes in evenwijdigen stand, dan bereikte de doorgelatene warmte een maximum; waren zij kruiselings geplaatst, dan werd een minimum van temperatuur door den thermo-multiplicateur aangewezen. Uit deze proef blijkt ten duidelijkste, dat de warmtestralen even als de lichtstralen voor polarisatie vatbaar zijn.

Proeven, door Knoblauch (1848) in het werk gesteld, hebben getoond, dat niet alleen de lichtstralen, maar ook de warmtestralen, die deze vergezellen, in een kalkspath-kristal dubbel gebroken worden, dat de eene straalbundel de gewone wetten van de straalbreking volgt, en dat de andere, even als bij het licht, een buitengewonen straalbundel vormt. Door de beide bundels achtervolgens door een tweede kalkspath-kristal te doen gaan, bleek het hem, dat, wanneer de beide hoofddoorsneden evenwijdig of loodregt ten opzigte van elkander gerigt waren, de beide straalbundels in loodregt op elkander gerigte vlakken gepolariseerd waren. Gingen de warmtestralen door een kalkspath-kristal, dat lood-

regt op de as geslepen was, dan werden, even als bij het licht, deze verschijnselen niet waargenomen.

Uit onderzoekingen van de la Provostaye en Desains (1850) is voorts gebleken, dat ook door enkele straalbreking warmtestralen kunnen gepolariseerd worden volgens dezelfde wetten, die voor de polarisatie van het licht in dat geval zijn waargenomen. Ook de warmtestralen, in schuinsche rigting door een verwarmd oppervlak uitgestraald, bleken hun gepolariseerd te zijn in een vlak, loodregt op het vlak van uitstraling.

Eindelijk is het uit onderzoekingen van dezelfde natuurkundigen, als ook uit die van Biot, gebleken, dat de verschijnselen der circulaire polarisatie bij de warmtestralen even als bij de lichtstralen worden waargenomen. De omdraaijing van het polarisatie-vlak voor de warmtestralen heeft in dezelfde rigting plaats en is even groot als voor de lichtstralen, welke zij vergezellen.

454. **Identiteit van warmte en licht.** — De uit het voorgaande blijkbare overeenkomst tusschen de eigenschappen der warmtestralen en die der lichtstralen moet noodzakelijk leiden tot de vraag, of niet beide dezelfde zijn, en of beide werkingen, licht en warmte, niet aan eene gemeenschappelijke oorzaak moeten worden toegeschreven. Licht wordt, zoo als wij gezien hebben, thans algemeen toegeschreven aan den indruk, dien de trillingen van den alom verspreiden ether op ons gezigtsorgaan maken. Bij de behandeling van de warmte is het ons gebleken zeer waarschijnlijk te zijn, dat ook hare werkingen door de trillingen van zoodanige alom verspreide uiterst ijle stof moeten verklaard worden (238). Vroeger heeft men wel eens gemeend, dat de transversale trillingen dier stof aanleiding gaven tot lichtverschijnselen, hare longitudinale daarentegen tot warmteverschijnselen; de ontdekking van de polarisatie der warmtestralen, die alleen bij transversale trillingen mogelijk is, heeft echter dat denkbeeld doen ter zijde stellen. Beide moeten dus door transversale trillingen verklaard worden; brengt men dit in verband met hetgeen door Jamin en anderen bij het warmte-spectrum is waargenomen, dan komt men tot het besluit, dat die trillingen, welke het minst breekbaar zijn en de minste snelheid hebben (de trillingen toch nemen in snelheid af, naarmate men van het violet tot het rood nadert), warmte voortbrengen zonder op het gezigtsorgaan eenigen indruk te maken, terwijl de snellere en meer breekbare trillingen lichtsindrukken veroorzaken. De oorzaak van beide verschijnselen is dan dezelfde; de uitwerkselen alleen zijn verschillend. Dit komt ook overeen met de door Jamin waargenomene eigenschap, dat warmte- en lichtstralen van gelijke breekbaarheid steeds elkander vergezellen, en dat elke oor-

[illegible] die de eene begeleidt, [illegible] de andere eene gelijke werking [illegible]. De mogelijkheid om in sommige gevallen de warmtestralen en de lichtstralen van elkander te scheiden, schijnt wel [illegible] in strijd, maar men moet bij de verklaring daarvan [illegible] [illegible] werkingen door twee verschillende [illegible] worden waargenomen, en [illegible] de trillingen der zoogenaamde donkere warmtestralen waar ons gevoel [illegible] voor andere gewaarwordingsmiddelen merkbaar zijn, [illegible] worden voortgebragt, daar zij wellicht door de werking van het oog [illegible] worden, alvorens [illegible] te komen.

Mag men dus omtrent de identiteit van warmte en licht nog geene volkomene zekerheid hebben, als waarschijnlijk mogen wij haar op grond van het voorgaande wel aannemen. Het verband tusschen de verschillende natuurverschijnselen wordt door zoodanige onderstelling grooter, en de algemeene theorie eenvoudiger. Neemt men voorts in aanmerking, wat wij hiervoor [illegible] in het midden gebragt aangaande de mechanische theorie der warmte en omtrent het verband tusschen warmte en electriciteit, alsmede over de mogelijkheid, dat ook de electrische verschijnselen eene voldoende verklaring zullen kunnen vinden in eene trillende beweging van een dergelijken of van denzelfden ether, dan is wellicht het tijdstip niet ver meer verwijderd, waarop men in staat zal zijn al deze verschijnselen uit eene gemeenschappelijke oorzaak te verklaren en alzoo een innig verband aan te wijzen tusschen eene menigte natuurverschijnselen, die men vroeger als geheel op zich zelven staande had beschouwd.

ALPHABETISCH REGISTER.

(De nummers zijn die der paragrafen.)

A.

B.

C.

D.

E.

F.

G.

H.

P.

Q.

R.

S.

T.

U.

V.

W.

Z.

ERRATA.

Bladz.	54	regel	1 v. o.	*staat:*	begrepen;	*lees:*	begrepen is.
„	56	„	11 v. o.	„	v' 0;	„	$v' = 0$.
„	90	„	9 v. o.	„	48 5 14;	„	48 50 14.
„	140	„	12 v. o.	„	zooveel;	„	zoowel.
„	196	„	8 v. b.	„	eene;	„	een.
„	206	„	13 v. b.	„	C♯, F;	„	C♯, F♯.
„	208	„	14 v. b.	„	2,3;	„	2,6.
„	226	„	1 v. o.	„	1724;	„	1714.
„	228	„	1 v. o.	„	1638;	„	1621.
„	234	„	11 v. b.	„	welke;	„	welk.
„	243	„	8 v. b.	„	hunnen zwarten;	„	hunne zwarte.
„	249	„	2 v. o.	„	1838;	„	1827.
„	265	„	4 v. b.	„	360°;	„	350°.
„	267	„	5 v. o.	„	$P-P_1$;	„	$P-P_2$.
„	„	„	1 v. o.	*achter de formule te voegen:*			waarin $m = (t-t')\alpha$.
„	269	„	17 v. b.	*staat:*	hem;	*lees:*	haar.
„	281	„	1 v. b.	„	hunne;	„	hare.
„	353	„	16 v. b.	„	zwave;	„	zwavelether.
„	381	„	15 v. o.	„	een;	„	eene.
„	406	„	9 v. o.	„	den galvanischen;	„	de galvanische.
„	407	„	9 v. b.	„	een galvanischen;	„	eene galvanische
„	411	„	10 v. b.	„	den keten;	„	de keten.
„	412	„	15 v. o.	„	den negatieven;	„	de negatieve.
„	505	„	8 v. o.	„	verminderden;	„	verminderen.

Fig. 407. De lijn OD moet het verlengde zijn van HD, en niet, zooals ten onregte is aangewezen, van CD.

Fig. 422. Het punt D is in deze afbeelding niet juist geplaatst, maar moet ongeveer een duim meer regts gelegen zijn, zoodat DE loodregt staat op BC, en E even ver achter BC is gelegen, als D er vóór ligt. De lijnen DE, DF, DT, DM, DR, DO, DN en DS veranderen daardoor allen eenigzins van rigting.

Ma overleden den 27 December 1871 des morgens ten 9 uur. —

